

Karakterisering van de freatische grondwaterstand in Nederland

Opdrachtgever: RIZA

Karakterisering van de freatische grondwaterstand in Nederland

Bepaling van de GxG en xG3 voor 1995 op puntlocaties

J.W.J. van der Gaast

H.Th.L. Massop

Alterra-Rapport 819

Alterra, Wageningen, 2003

REFERAAT

Gaast, J.W.J. van der en H.Th.L. Massop, 2003. *Karakterisering van de freatische grondwaterstand in Nederland; Bepaling van de GxG en xG3 voor 1995 op puntlocaties*. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 819. 83 blz. .23 fig.; 9 tab.; .20 ref.

In dit onderzoek is de freatische grondwaterstand landelijk gekarakteriseerd zodat deze gegevens gebruikt kunnen worden voor kalibratie van hydrologische modellen. Met tijdreeksanalyse is de klimaatsrepresentatieve GHG en GLG bepaald voor peilbuislocaties. Daarnaast zijn de HG3 en de LG3 voor het kalenderjaar 1995 berekend. Op basis van stambuisregressie zijn veldmetingen van grondwaterstanden die gedurende de winter en de zomer op een groot aantal gerichte opnamelocaties zijn verzameld, omgezet naar gemiddelde grondwaterstandskarakteristieken. Er is een databestand opgezet dat bestaat uit ca. 3100 buislocaties en ca. 9400 gerichte opnamelocaties waarvoor de HG3-95, LG3-95, GHG en GLG alsmede de onzekerheid is gekwantificeerd.

Trefwoorden: GHG, GLG, Grondwaterstand, Grondwatertrap, Gt, Stambuisregressie, Tijdreeksanalyse, Tijdreeksmodellering

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door €23,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-Rapport 819. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2003 Alterra
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info@alterra.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Doelstelling	11
1.3 Begrippenkader	11
1.4 Leeswijzer	13
2 Gegevensverzameling	15
2.1 Grondwaterstandsbuizen	15
2.1.1 Stambuizen	15
2.1.2 Overige buizen	16
2.2 Gerichte opnamen in boorgaten	17
2.3 Meteorologische gegevens	18
3 Grondwaterstandskarakteristiek op basis van tijdreeksmodellering	21
3.1 Methode	21
3.2 Gevoeligheidsanalyse	23
3.2.1 Het effect van meet- of invoerfouten	23
3.2.2 Het effect van de kalibratieperiode	24
3.2.3 Het effect van meteostations	30
3.3 Fysische interpretatie van tijdreeksparameters	31
4 Grondwaterkarakteristiek op basis van stambuisregressie	35
4.1 Methode	35
4.1.1 Gerichte opnamen	35
4.1.2 Grondwaterkarakteristiek	35
4.2 Gevoeligheid van de stambuisregressie	38
5 Resultaten	41
5.1 Grondwaterstandsbuizen	41
5.2 Gerichte opnamepunten	41
5.2.1 Extrapolatie	42
5.2.2 GxG	43
5.2.3 xG3	51
6 Conclusies en aanbevelingen	55
6.1 Tijdreeksmodellering	55
6.2 Stambuisregressie	57
6.3 Resultaten	58
Literatuur	59

Aanhangsels

1 GxG berekend op basis van meetgegevens	61
2 GxG berekend op basis van tijdreeksanalyse	63
3 Tijdreeksresultaten bij kalibratie op bijna 30 jaar	65
4 Voortschrijdend gemiddelde neerslagoverschot	69
5 Fysische parameters	71
6 Relaties meetdata	73
7 Stambuisregressie	79
8 Vertaling van de grondwatertrap naar GxG	83

Woord vooraf

Als uitvloeisel van de Startovereenkomst WB21 is de *Droogtestudie Nederland* gestart. Rijk, provincies, waterschappen en gemeenten zijn gezamenlijk bij de uitvoering van de studie betrokken. De Droogtestudie Nederland is een integrale studie naar het waterbeleid en -beheer in periodes met een schaarste aan water. Het doel van de verkenning is een goed beeld te krijgen van de aard, ernst en omvang van de droogteproblematiek in Nederland nu en in de toekomst en oplossingsrichtingen voor de korte en de lange termijn.

Modelberekeningen spelen een grote rol in de Droogtestudie Nederland. Droogtesituaties treden meestal op in het hele land en in alle watersystemen: het nationale hoofdsysteem van oppervlaktewateren, de regionale oppervlakte-watersystemen en het water in de bodem. Al deze systemen wisselen water met elkaar uit en de vele watergebruikers putten water uit de verschillende systemen. Om dit complexe systeem te begrijpen, om voorspellingen te kunnen doen over toekomstige situaties en om de gevolgen van maatregelen te toetsen is een complex modelleninstrumentarium nodig. Ook omdat droogtesituaties zelf complexe situaties zijn ligt het gebruik van computermodellen voor de hand. Droogte kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door kleine hoeveelheden water in de rivieren, maar ook door weinig regen en door veel verdamping in de zomer. Droogte zal dan ook niet uniform over het land verdeeld zijn.

In het kader van de Droogtestudie Nederland heeft het RIZA, aan Alterra opdracht gegeven om de freatische grondwaterstand te karakteriseren zodat het RIZA een basis heeft voor het kalibreren van haar hydrologisch modelinstrumentarium. Het gaat hierbij voornamelijk om de gegevens voor het kalibratiejaar 1995.

De onderzoekers zijn Timo Kroon, Paul van Walsum, Tom Hoogland en Dick Brus zeer erkentelijk voor hun opbouwende kritiek met betrekking tot de rapportage van dit project.

Samenvatting

Als uitvloeisel van de Startovereenkomst WB21 is de *Droogtestudie Nederland* gestart. In het kader van de Droogtestudie Nederland heeft het RIZA, aan Alterra opdracht gegeven om de freatische grondwaterstand te karakteriseren zodat het RIZA een basis heeft voor het kalibreren van haar hydrologisch modelinstrumentarium. Het gaat hierbij voornamelijk om de gegevens voor het kalibratiejaar 1995. Het doel van het project is het berekenen van de gemiddeld hoogste (HG3) en gemiddeld laagste (LG3) grondwaterstand voor het kalenderjaar 1995 en de klimaatrepresentatieve GHG en GLG. De bepaling van de genoemde parameters heeft betrekking op puntgegevens namelijk peilbuizen en gerichte opnamelocaties. De gebruikte peilbuisgegevens zijn onderverdeeld in twee categorieën, stambuizen die gebruikt zijn bij de Gt-actualisatie en gecontroleerd zijn qua ligging en meetgegevens en overige buislocaties.

Voor de bepaling van de klimaatrepresentatieve GxG is voor de peilbuizen gebruik gemaakt van tijdreeksanalyse. Bij tijdreeksmodellering wordt in een peilbuis de samenhang gemodelleerd tussen het neerslagoverschot en de gemeten grondwaterstanden. Het tijdreeksmodel dat deze samenhang beschrijft wordt daarna toegepast op langjarige reeksen van neerslagoverschotten. Hieruit volgen langjarige tijdreeksen van grondwaterstanden die nauw aansluiten op de metingen en representatief zijn voor de klimaatperiode. Deze reeksen kunnen worden samengevat in beschrijvende parameters zoals de GxG en Gt. Om inzicht te krijgen in de onzekerheid van de berekende GxG is het effect van de gebruikte kalibratieperiode en het effect van het gebruik van verschillende meteostations nader onderzocht. Temporele verschillen in meteorologische omstandigheden blijken meer effect te hebben op de berekende GxG dan ruimtelijke verschillen in meteorologische gegevens.

Om de gemeten grondwaterstanden op de gerichte opnamelocaties te transformeren naar xG3-95 en GxG is gebruik gemaakt van stambuisregressie. Bij de stambuisregressie wordt aan de hand van regressieanalyse een winter- of zomermeting gecorrigeerd voor te natte of te droge omstandigheden ten opzichte van de GHG of de GLG. Er wordt van uitgegaan dat er gebruik wordt gemaakt van een stambuizenset die de belangrijkste variatie in hydrologische omstandigheden (geohydrologie en ontwaterings situatie) representeert. De meetdatum blijkt van grote invloed op de regressierelatie. Metingen die dichterbij het respectievelijk GHG en GLG moment liggen hebben een sterkere relatie met de GxG dan metingen die sterk afwijken van de relatief natte en droge situatie. Vooral bij de voorspelling van de GHG en de HG3-95 vindt er een afvlakking plaats. Natte GHG's worden droger en droge GHG's worden natter voorspeld. Voor de GLG en de LG3 is deze afvlakking minimaal.

De plausibiliteit van de uitkomsten voor de gerichte opnames is bekeken aan de hand van figuren waarin de berekende GHG tegen de GLG wordt uitgezet. Een aantal

resultaten blijken gezien de definitie van de GxG fysiek onmogelijk. Daarnaast blijkt uit buisgegevens dat het verschil tussen de GHG en de GLG vaak minimaal 20 cm is. Door extrapolatie bij de stambuisregressie kan voor de GxG van de gerichte opnamepunten een irreële waarde worden voorspeld. Dergelijke waarden zijn uit het databestand verwijderd. Selectie van de data heeft uiteindelijk geresulteerd in een consistente dataset op basis van verschillende gegevensbronnen. De dataset bestaat uit 424 stambuizen, 2695 overige peilbuizen en 9376 gerichte opnamepunten, voor deze locaties is de GxG en de xG3-95 berekend.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

RIZA wil in het kader van de droogtestudie haar hydrologisch modelinstrumentarium kalibreren. Voor de kalibratie van deze modellen zijn op korte termijn gegevens nodig over de diepte van freatische grondwaterstanden, die representatief zijn voor heel Nederland. In opdracht van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) en diverse waterschappen heeft Alterra in de afgelopen jaren een zeer omvangrijk bestand met actueel gemeten grondwaterstanden aangelegd. Deze gegevens zijn gebruikt voor de actualisatie van de grondwatertrappenkaart (Gt-kaart). In de loop van 2003 zal ca. 54% van het oppervlak van Nederland op deze wijze zijn geactualiseerd. De gegevens die ten grondslag liggen aan deze kartering bestaan uit tijdreeksen van grondwaterstanden en gerichte opnamen op een groot aantal locaties. Voor het RIZA is het wenselijk voor de kalibratie van haar modelinstrumentarium voor de Droogtestudie Nederland over een bestand te beschikken met landsdekkende data voor het specifieke jaar 1995.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project is het berekenen van de gemiddeld hoogste (HG3) en gemiddeld laagste (LG3) grondwaterstand voor het kalenderjaar 1995 voor peilbuizen met korte meetreeksen en voor locaties waarvoor in het kader van de Gt-actualisatie door Alterra 1 of 2 keer op gericht geselecteerde tijdstippen de grondwaterstand is gemeten. Nevendoelen van het project zijn het bepalen van de onzekerheid in de berekende HG3 en LG3 voor het jaar 1995 en het berekenen van de GHG en de GLG voor deze puntlocaties.

1.3 Begrippenkader

In dit onderzoek is de freatische grondwaterstand gekarakteriseerd op puntlocaties. De karakterisering van de grondwaterstand is grotendeels gebaseerd op de grondwatertrap (Gt) en een aantal daarmee samenhangende gegevens. Dit heeft tot gevolg dat er gebruik wordt gemaakt van een aantal afkortingen en begrippen die specifiek zijn voor de karakterisering van de grondwaterstand en de Gt. De in dit rapport gebruikte afkortingen en begrippen worden hier kort toegelicht:

Grondwaterstand is de stijghoogte van het freatische grondwater ten opzichte van het maaiveld, gemeten in een boorgat of een peilbuis met een ondiep filter (in het algemeen minder dan 5 meter onder het maaiveld);

HG3 en *LG3* zijn de gemiddelde van de drie hoogste respectievelijk de drie laagste grondwaterstanden die in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) worden gemeten, uitgaande van een halfmaandelijke meetfrequentie;

VG3 is de gemiddelde grondwaterstand voor de meetdata 14 maart, 28 maart en 14 april in een bepaald kalenderjaar;

HG3-95, *VG3-95* en *LG3-95* zijn de gemiddelde grondwaterstanden overeenkomstig de eerder genoemde definitie, met het verschil dat de toevoeging 95 staat voor het jaar 1995 en er uitgegaan is van het kalenderjaar in plaats van het hydrologische jaar;

xG3 staat in dit rapport voor de begrippen *HG3*, *VG3* en *LG3* tezamen;

xG3-95 staat in dit rapport voor de *xG3* voor het specifieke kalenderjaar 1995;

GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand) is gedefinieerd als het gemiddelde van de *HG3* over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden;

GLG (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) is gedefinieerd als het gemiddelde van de *LG3* over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden;

GVG (Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand) is in dit rapport gedefinieerd als het gemiddelde van de *VG3* over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden;

GxG staat in dit rapport voor de begrippen *GHG*, *GVG* en *GLG* tezamen;

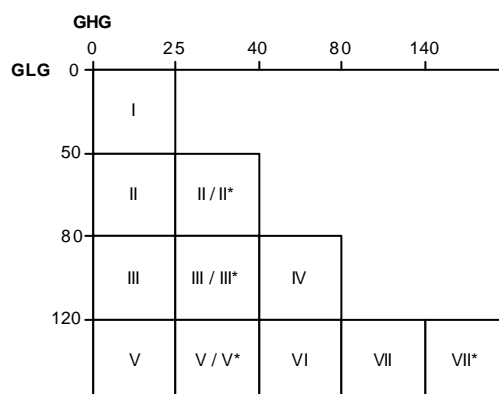
Klimaatrepresentatieve GxG betekent in dit rapport: de *GxG* zoals die berekend zou kunnen worden uit metingen in de volgende situatie:

- (i) Over een aangesloten periode wordt gedurende 30 jaar op de 14e en 28e van elke maand de freatische grondwaterstand gemeten;
- (ii) Gedurende deze periode verandert er niets aan het huidige peilbeheer, de inrichting van het watersysteem, het debiet van grondwateronttrekkingen en cetera (geen nieuwe c.q. verandering in menselijke ingrepen);
- (iii) De *GxG* wordt op basis van deze gegevens berekend (eerst per hydrologisch jaar de *HG3*, *VG3* (*VG3* per kalenderjaar) en *LG3*, daarna het 30-jaarse gemiddelde van de *HG3*, *VG3* en *LG3* resulteren in *GHG*, *GVG* en *GLG*).

De aldus verkregen *GxG* representeert het effect van de gehele weersvariatie binnen de klimaatperiode van 30 jaar, gegeven de huidige ontwaterings situatie.

xG staat in dit rapport voor de *GxG* en de *xG3-95*;

De *Gt* (Grondwatertrap) is een typische combinatie van *GHG*- en *GLG*-klassen welke volgens een oude indeling op de onderstaande wijze is onderverdeeld:



1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de gegevensverzameling beschreven. In dit hoofdstuk wordt onder andere kort ingegaan op de kwaliteitscontroles die zijn uitgevoerd op de gegevens en de daarmee samenhangende status van de verschillende gegevens. Het derde hoofdstuk beschrijft de gebruikte methodiek voor de tijdreeksanalyse en het effect van verschillende onzekerheden op de tijdreeksmodellering. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de stambuisregressie. Deze techniek is gebruikt om de incidenteel gemeten grondwaterstanden op de gerichte opnamelocaties om te zetten naar GxG en xG3. Naast de methode wordt in dit hoofdstuk ook ingegaan op het effect van het meettijdstip van de incidentele metingen op de voorspelde GxG en xG3. In hoofdstuk 4 worden de resultaten beschreven voor zowel de grondwaterstandsbuizen als de gerichte opnamelocaties. In het laatste hoofdstuk (hoofdstuk 6) worden de conclusies en aanbevelingen beschreven.

2 Gegevensverzameling

2.1 Grondwaterstandsbuizen

De in dit onderzoek gebruikte grondwaterstandmeetreeksen komen uit DINO (Data en Informatie Nederlandse Ondergrond), de databank van NITG-TNO. De voor dit onderzoek gebruikte buislocaties zijn te verdelen in twee categorieën, namelijk:

- Stambuizen die gebruikt zijn bij de Gt-actualisatie;
- Overige buizen.

De stambuizen zijn op een andere manier geselecteerd dan de overige buislocaties en zijn gebruikt bij de Gt-actualisatie. Hieronder wordt beschreven hoe tot een bruikbare selectie van grondwaterstandmeetreeksen is gekomen voor de twee verschillende categorieën.

2.1.1 Stambuizen

De voor dit onderzoek gebruikte stambuizen zijn de stambuizen die gebruikt zijn bij de Gt-actualisatie. Het betreft alleen buizen in het pleistocene deel van Nederland. Voor het Gt-actualisatie onderzoek zijn de grondwaterstandbuizen als volgt geselecteerd. In eerste instantie zijn alle landbouwbuizen en peilbuizen per topografisch kaartblad, (schaal 1:25 000) geselecteerd, inclusief de buizen uit het OLGA-SUN deel van het archief. Met behulp van een selectieprocedure binnen DINO is het buizenbestand per kaartblad ingeperkt tot de buizen met een bovenste filterdiepte van maximaal 5 m beneden maaiveld. Vervolgens werden die buizen uitgekozen met een opnamefrequentie van minimaal 9 waarnemingen per hydrologisch halfjaar, en een aaneengesloten meetreeks van minimaal 4 jaar doorlopend tot minimaal een half jaar voor het begin van de kartering. (Het invoeren van grondwaterstanden in DINO loopt ongeveer een half jaar achter.) Voor OLGA-SUN buizen moesten de meetreeksen minimaal 1,5 jaar lang zijn. Van deze geselecteerde buizen werden via NITG-TNO (in sommige gevallen via de terreinbeheerders) de situatieschetsen verkregen. Tijdens het aansluitende veldbezoek is voor een deel van deze selectie de kwaliteit beoordeeld.

Belangrijke beoordelingscriteria waren:

- de afstand tot rivier of kanaal (minimaal 40 à 50 m);
- de afstand tot waterlopen en beken (minimaal 20 à 25 m);
- de afstand tot een watervoerende perceelssloot (minimaal 8 à 10 m).

Bij de beoordeling is ook gelet op de ligging van het meetpunt. Hierbij is bekeken of het meetpunt onder invloed staat van oppervlakkige afvoer van water, of het meetpunt in een terreinlaagte dan wel in dijken of nabij verhard oppervlak ligt. Tenslotte zijn van grondwaterstandbuizen, die na de voorgaande stappen nog deel uitmaken van de selectie, de grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld

opgevraagd ten behoeve van de tijdreeksanalyse. In figuur 1 zijn de locaties van de in dit onderzoek gebruikte stambuizen (424) weergegeven.



Figuur 1 Overzicht van de locaties van de stambuizen

2.1.2 Overige buizen

Voor de selectie van de overige meetlocaties is aangesloten bij een onderzoek naar de kwaliteit van de Gt-informatie van de bodemkaart van Nederland 1:50000. (Heidema, 2001).

Voor dit kwaliteitsonderzoek zijn de DINO grondwaterstandsbuizen op basis van de volgende criteria geselecteerd:

- Landbouwbuizen en peilbuizen met een bovenste (ondiepe) filter van maximaal 5 m beneden maaiveld.
- De meetreeks moet minimaal 5 jaar lang zijn, met minimaal 19 metingen per jaar.
- De meetreeks moet minimaal doorlopen tot en met het jaar 2000.

Van alle buizen die voldoen aan deze criteria zijn de meetreeksen weergegeven in een tijdstijghoogte grafiek en zijn de grafieken vervolgens visueel beoordeeld. Indien de grafiek een duidelijke trend of abnormale, extreme sprong(en) vertoont (die mogelijk veroorzaakt wordt door peilveranderingen, verplaatsingen van de buis of meet- of invoerfouten), is de desbetreffende grondwaterstandsbuis verwijderd uit de selectie. Er heeft geen kwaliteitsbeoordeling van de buizen in het veld plaatsgevonden. In figuur 2 zijn de locaties van de in dit onderzoek gebruikte overige buizen (2695) weergegeven.



Figuur 2 Overzicht van de locaties van de overige buizen

2.2 Gerichte opnamen in boorgaten

In het kader van de Gt-actualisatie zijn op een groot aantal locaties grondwaterstanden gemeten in boorgaten op vooraf vastgestelde locaties en tijdstippen. Hiermee is het meetnet van grondwaterstanden verdicht zodat het mogelijk was om statistische relaties met maaiveldhoogten en daarvan afgeleide eigenschappen te kunnen bepalen.

Voor de keuze van de meetlocaties zijn de Gt-actualisatiegebieden opgedeeld in een aantal deelgebieden. Het onderscheiden van deelgebieden wordt stratificatie¹ genoemd. In het kader van de Gt-actualisatie zal in elk van de deelgebieden uiteindelijk een unieke relatie tussen GHG, GVG en GLG en maaiveld-gerelateerde parameters worden vastgesteld en toegepast. Het doel van stratificatie is om de onzekerheid van de GxG kaarten te minimaliseren. Hiertoe worden de deelgebieden onderscheiden op basis van hydrologisch gerelateerde en topografisch (hoogte-) gerelateerde eigenschappen. Er wordt verondersteld dat binnen elk deelgebied een uniforme relatie tussen maaiveld-gerelateerde eigenschappen en de GxG bestaat, die tijdens het Gt-actualisatie onderzoek met regressietechnieken wordt bepaald. Tussen deelgebieden kunnen deze relaties aanmerkelijk verschillen.

¹ Stratificatie is het onderverdelen van een gebied in hydrologisch homogene deelgebieden, ook wel *strata* genoemd. Met "hydrologisch homogeen" wordt bedoeld: een vergelijkbare hydro-geologische en bodemkundige ondergrond. Soms wordt de landschappelijke ligging (beekdalen), het peilbeheer (grote polders) en het landgebruik (grote natuurgebieden met karakteristiek peilbeheer) bij de stratificatie betrokken.

Voor de Gt-actualisatie is per deelgebied op gemiddeld 30 locaties de grondwaterstand gemeten. De metingen hebben plaatsgevonden op een tijdstip waarop de grondwaterstand in stambuizen zich nabij het GHG en het GLG moment bevindt. In grotere deelgebieden is het aantal meetpunten groter (tot maximaal 60 locaties), in kleinere deelgebieden kleiner, tot minimaal 25 locaties. Daarnaast zijn de opname locaties zo gekozen dat deze locaties zo goed mogelijk verspreid zijn over het deelgebied (geografische spreiding) en de voorkomende maaiveldhoogten binnen het deelgebied, zodat de afgeleide statistische relatie voor het gehele stratum en de daarin voorkomende maaiveldhoogten geldig verondersteld mag worden. In de praktijk leidt het bovenstaande tot een gemiddelde van 1 locatie per 110 hectare. De locaties zijn als volgt gekozen:

1. Met gedetailleerde waterloopinformatie uit het top10-vectorbestand en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) is een kaart van de drooglegging gemaakt (Finke et al., 2002);
2. Voor elk stratum is bepaald op hoeveel locaties de grondwaterstand wordt gemeten. Gemiddeld zijn dit er ongeveer 30;
3. Alle pixels van een stratum worden gesorteerd op basis van de berekende drooglegging van nat (ondiep) naar droog (diep);
4. De gesorteerde pixels worden zodanig geclassificeerd dat het aantal klassen overeenkomt met het aantal te bemeten locaties. Deze klassen zijn kleiner bij "natte" dan bij "droge" droogleggingen. Hiermee wordt er voor gezorgd dat er meer waarnemingen in de natte terreindelen worden gedaan;
5. Per klasse wordt één waarnemingslocatie geloot (en 2 reservelocaties op voldoende afstand).

Op elke locatie is twee keer gemeten: één maal in de winter en één maal in de zomer. Omdat zowel het tijdstip als de locatie van de opnames vooraf worden bepaald, wordt er gesproken van twee "gerichte opnames". Tijdens het veldwerk worden boorgaten gemaakt tot 10 centimeter onder het grondwaterniveau (maar nooit dieper dan 2,50 meter -mv). Na een instelperiode (1 à 2 dagen) wordt de grondwaterstand gemeten. Op de tijdstippen van de opnames van de grondwaterstanden zijn ook grondwaterstanden gemeten in een aantal stambuizen waarvan met behulp van tijdreeksanalyse de GxG is berekend.

2.3 Meteorologische gegevens

Voor de tijdreeksmodellering is het van belang om te beschikken over goede meteorologische gegevens. Het neerslagoverschot en de grondwaterstand van de vorige dag zijn de verklarende variabelen in de tijdreeksmodellen. Het gebruikte neerslagoverschot is het verschil tussen de neerslag en de potentiële verdamping op dagbasis. Omdat het hier gaat om statistische modellen is het meestal voldoende om te werken met de waarden van neerslag en potentiële verdamping zoals die worden gemeten op nabijgelegen meteostations (Bierkens en Bron, 2000). In Nederland betekent dit, dat voor de potentiële verdamping de Makkink referentieverdamping (E_k^r) wordt gebruikt. Deze geeft de verdamping van kort gras dat optimaal van water wordt voorzien. In werkelijkheid is er een actuele verdamping die afhankelijk is van

het landgebruik en de beschikbaarheid van water voor de plant. In figuur 3 is een overzicht gegeven van de gebruikte meteostations en de gebieden waarvoor het betreffende meteostation is gebruikt. De gebieden zijn bepaald met behulp van Thiessenpolygonen. Voor de verdampingsgegevens is gebruik gemaakt van de KNMI hoofdstations.



Figuur 3 Overzicht van de meteostations.

3 Grondwaterstandskarakteristiek op basis van tijdreeksmodellering

3.1 Methode

De GHG, GVG en GLG in grondwaterstandbuizen zijn gedefinieerd op basis van stationaire² meetreeksen van grondwaterstanden die minimaal 8 jaar bestrijken waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In de praktijk is het een probleem om meetreeksen te vinden die aan deze criteria voldoen, omdat grondwaterstandbuizen regelmatig worden verplaatst of verwijderd, of omdat er hydrologische ingrepen hebben plaatsgevonden. Om deze reden worden meetreeksen met een lengte van 4-8 jaar vaak noodgedwongen geaccepteerd. Voor kortere periode kan het voorkomen dat het weer in de afgelopen 4-8 jaar systematisch natter of droger was dan het gemiddelde voor de klimaatperiode, waardoor bijvoorbeeld een GHG wordt onder- of overschat. Uit een analyse van Knotters en van Walsum (1994) en Knotters en Bierkens (1999) blijkt dat reeksen van 4-8 jaar meestal lang genoeg zijn om de samenhang tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand te kunnen modelleren.

Bij tijdreeksmodellering wordt in een peilbuis de samenhang gemodelleerd tussen het neerslagoverschot en de gemeten grondwaterstanden. Het tijdreeksmodel dat deze samenhang beschrijft wordt daarna toegepast op langjarige reeksen van neerslagoverschotten die door het KNMI zijn bepaald. Hieruit volgen langjarige tijdreeksen van grondwaterstanden die nauw aansluiten op de metingen en representatief zijn voor de klimaatperiode. Deze reeksen kunnen worden samengevat in beschrijvende parameters zoals de GxG en Gt maar ook in de vorm van duurlijnen en regimecurves en vormen daarmee de basis voor de kartering van de grondwatersituatie. De klimaatsrepresentatieve GxG worden dus in peilbuizen berekend uit tijdreeksanalyse, en zijn voor te stellen als de GxG zoals die zou kunnen worden berekend als vanaf 30 (hydrologische) jaren geleden de grondwaterstanden zouden zijn gemeten op de 14e en 28e van elke maand. In deze 30 jaar mogen er geen ingrepen in de grondwatersituatie plaats hebben gevonden die buiten het huidige peilbeheer vallen.

Om aan de bezwaren van korte tijdreeksen van grondwaterstanden tegemoet te komen, is de bovengenoemde methode ontwikkeld, waarmee met een meetreeks van 4-8 jaar op een meetlocatie een klimaatsrepresentatieve GHG, GLG en GVG kan worden bepaald. Deze methode gebruikt langjarige (30 jaren en meer) meetreeksen van de neerslag en verdamping, welke landsdekkend beschikbaar zijn. Er wordt een relatie gelegd tussen tijdreeksen van het neerslagoverschot en de gemeten

² Een stationaire meetreeks heeft een constant gemiddelde en een constante variantie, waardoor deze onafhankelijk zijn van de tijd. In de praktijk komt het er op neer dat een meetreeks alleen stationair kan zijn indien er gedurende de reeksperiode geen waterhuishoudkundige ingrepen binnen de invloedssfeer van het meetpunt hebben plaatsgevonden.

grondwaterstand. Die relatie wordt vervolgens toegepast over de gehele tijdreekslengte (30 jaar) van het neerslagoverschot om klimaatsrepresentatieve tijdreeksen van grondwaterstanden te genereren, waaruit dan de GHG, GVG, GLG (maar ook de andere kenmerken van de Gd zoals regimecurve, duurlijn en kwelklasse) kunnen worden afgeleid (Knotters en Van Walsum, 1994). De berekening van GHG, GVG en GLG verloopt in 2 stappen:

1. per hydrologisch jaar wordt het gemiddelde van de drie hoogste (HG3) en laagste (LG3) grondwaterstanden genomen, dan wel het gemiddelde van de stand op 14 en 28 maart en 14 april (VG3);
2. de HG3, VG3 en LG3 worden gemiddeld over de 30-jaarsetijdreekslengte.

Transfer-ruismodel (KALTFN)

De relatie tussen neerslagoverschot en grondwaterstand bestaat uit twee gesommeerde componenten: een deterministische component die het neerslagoverschot koppelt aan de grondwaterstand, en een ruiscomponent. De relatie wordt daarom transfer-ruismodel genoemd. Het gebruik van alleen de deterministische component zou leiden tot onderschatting van de temporele variatie (de variatie in de tijd). Het toevoegen van een ruiscomponent voorkomt dit. Dit is nodig, omdat zowel de GHG als de GLG extreme grondwaterstanden voorspellen. Een onderschatting van de temporele variatie zou leiden tot een te diepe GHG en een te ondiepe GLG.

De algemene vorm van het transfer-ruismodel (KALTFN) is:

$$h_t = h_t^* + n_t \quad (1)$$

$$h_t^* = ah_{t-1}^* + bP_t \quad (2)$$

$$n_t = c + f(n_{t-1} - c) + e_t \quad (3)$$

waarin: t is de tijdstapgrootte (1 dag), h_t is de grondwaterstand op dag t en P_t is het neerslagoverschot op dag t , h_t^* is het deterministisch deel van de grondwaterstand op tijdstap t , n is de autoregressieve ruiscomponent op tijdstap t en e_t is het witte ruis proces. c is een niveauparameter (cm tov referentieniveau) en f is de autoregressieve parameter van het ruismodel.

De overige symbolen zijn coëfficiënten. De deterministische component h_t^* wordt geschat met:

- de vorige grondwaterstandmeting (h_{t-1}) uit de gesimuleerde tijdreeks en
- het neerslagoverschot tussen de huidige en de vorige meting (P_t)

De coëfficiënten a en b zijn de gewichten die aan respectievelijk de vorige grondwaterstandmeting en het laatste neerslagoverschot worden toegekend.

De ruiscomponent ($n_{t-1} - c$) wordt geschat met:

- de vorige waarde uit de tijdreeks van het ruissignaal;
- de witte ruiscomponent (e_t) voor de laatste meting.

Het bovenbeschreven transfer-ruis model is ingebed in een Kalman-filter waardoor het geschikt is voor onregelmatig gemeten grondwaterstanden.

De coëfficiënten van het transfer-ruismodel zijn gekalibreerd met het programma *KALTFN* (Bierkens *et al.*, 1999). De gebruikte neerslaggegevens voor elke peilbuis zijn afkomstig van het dichtstbijzijnde meteostation, waarvoor een neerslagreeks van 30 jaar beschikbaar is. De referentie-gewasverdamping is voor de peilbuizen afkomstig van een van de KNMI hoofdstations.

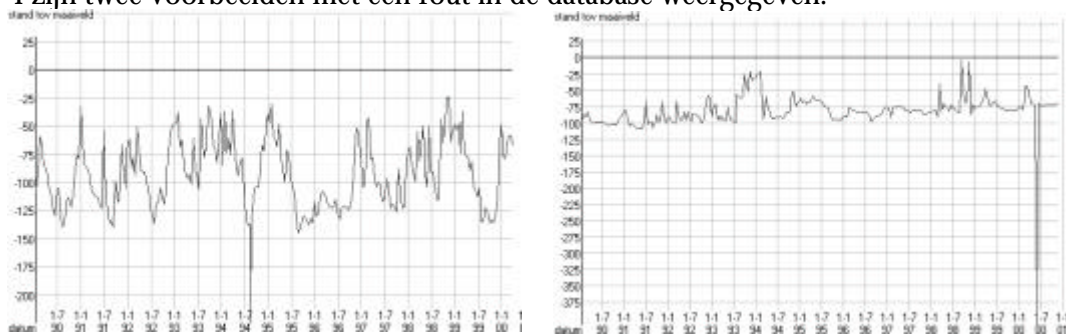
Bij de kalibratie van het tijdreeksmodel voor een peilbuis worden de gemeten grondwaterstanden in deze peilbuis vergeleken met het neerslagoverschot van het dichtstbijzijnde neerslagstation, voor de tijdperiode die de grondwaterstanden bestrijken. Na kalibratie van het tijdreeksmodel wordt dit model vervolgens toegepast op een neerslagoverschotreeks voor de klimaatperiode 1970 t/m 2000 of 1969 t/m 1999 van het desbetreffende neerslagstation. Hiermee worden tijdreeksen van grondwaterstanden gegenereerd, welke worden omgezet in GHG, GVG en GLG. Daarnaast wordt de kwaliteit van deze voorspellingen van GxG berekend met de variantie van de voorspelfout.

3.2 Gevoeligheidsanalyse

Om de onzekerheid van de berekende GxG te onderzoeken is specifiek gekeken naar meet- en invoerfouten en zijn drie meetlocaties nader geanalyseerd. Er is gezocht naar buizen die gedurende een lange periode zijn waargenomen. Daarnaast is gekeken of de meetreeksen zijn onderbroken of dat de buizen zijn verplaatst. Verder is gezocht naar een relatief natte, een gemiddelde en een relatief droge locatie. Om inzicht te krijgen in de onzekerheid van de geschatte Gt is gekeken naar het effect van de kalibratieperiode en het effect van verschillende meteogebieden.

3.2.1 Het effect van meet- of invoerfouten

Zoals in paragraaf 2.1 is aangegeven zijn de grondwaterstandmeetreeksen afkomstig uit de DINO database. In de database kunnen meet- of invoerfouten voorkomen die een effect kunnen hebben op de kalibratieresultaten van de tijdreeksanalyse. In figuur 4 zijn twee voorbeelden met een fout in de database weergegeven.



Figuur 4 Voorbeelden van uitschieters in grondwaterstandsreeksen.

Het effect van dergelijke meet- of invoerfouten op het kalibratieresultaat van de tijdreeksanalyse blijkt sterk te verschillen en is op voorhand niet te voorspellen. Het gevonden effect van dergelijke meetfouten op de berekende GxG kan variëren van nog geen centimeter tot ongeveer 90 centimeter. Uit de praktijk blijkt dat het effect van de meetfouten vooral groot is indien de meetfout tegengesteld is aan de impuls, het neerslagoverschot. Een tijdreeks is immers een impuls-respons relatie. Indien de respons (= de grondwaterstand) als gevolg van een meetfout omhoog lijkt te gaan,

terwijl er geen neerslag is, kan één foutieve meting in een periode van ongeveer 10 jaar grote effecten hebben op de berekende GxG. Vooral meetfouten naar de natte kant hebben over het algemeen grote effecten op de uitkomsten. Deze meetfouten zijn echter vaak moeilijk visueel te herkennen. Afwijkingen naar de droge kant kan men vaak herkennen aan een zeer stijl verloop dat niet strookt met het normale uitzakkingsverloop van het desbetreffende meetpunt.

In het kader van dit project zijn alle meetreeksen van de stambuizen die gebruikt zijn bij de Gt-actualisatie visueel op meetfouten gecontroleerd. Een groot aantal meetfouten zijn op deze manier opgespoord en vervolgens uit de meetreeksen verwijderd. De overige buislocaties zijn binnen dit project niet gecontroleerd.

3.2.2 Het effect van de kalibratieperiode

Berekening van de GHG en de GLG

De GHG wordt in twee stappen berekend. Eerst wordt voor elk hydrologisch jaar (1 april-31 maart) het rekenkundig gemiddelde van de drie hoogste waargenomen grondwaterstanden berekend (=HG3). Daarbij wordt uitgegaan van een meetreeks met halfmaandelijkse waarnemingen (meestal gemeten op de 14^{de} en de 28^{ste} van de maand) en minimaal 19 metingen in het hydrologisch jaar. De GHG is dan gelijk aan de gemiddelde HG3 over een periode van minimaal 8 jaar. De GLG wordt op gelijke wijze berekend, maar dan als de gemiddelde LG3 (drie laagste waargenomen grondwaterstanden gedurende een hydrologisch jaar over een periode van minimaal 8 jaar).

Meetgegevens

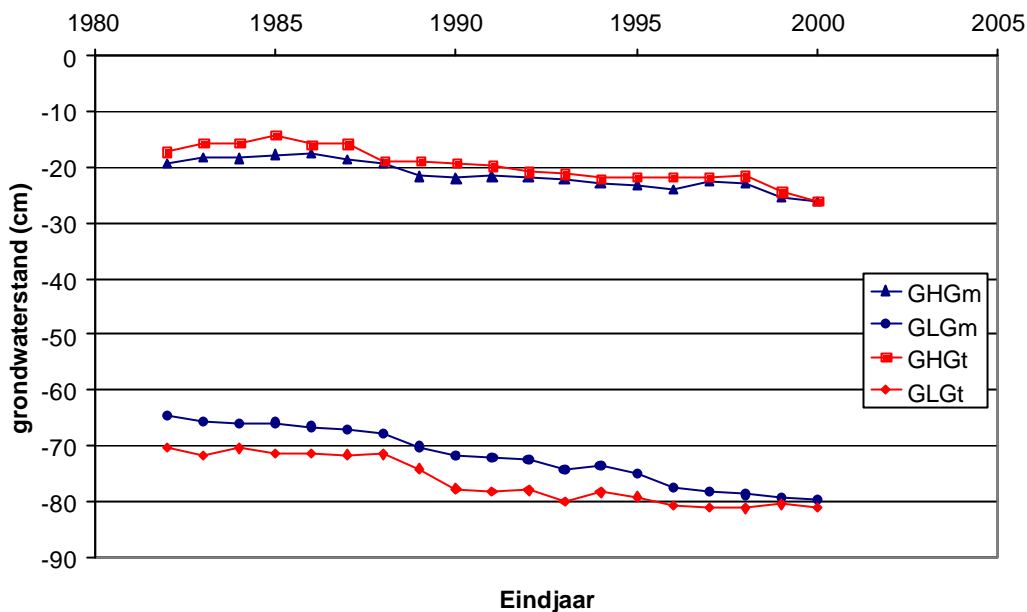
Voor de drie meetlocaties zijn de GHG en de GLG voor verschillende periodes bepaald. In eerste instantie is de GxG op basis van de meetgegevens bepaald. Om te kijken naar de invloed van het weer is de Gt voortschrijdend over 8 jaar berekend. Vervolgens zijn de berekende GHG en GLG's vergeleken met de berekening op basis van de gehele meetreeks (aanhangel 1). Zoals bekend is er een fluctuatie te zien in de berekende Gt over 8 jaar als gevolg van meer droge of natte jaren (Massop et al., 2000; van der Wouw, 2000).

Tijdreeksanalyse

Vervolgens is gebruik gemaakt van tijdreeksanalyse om de GxG klimaatrepresentatief te maken. Om de klimaatrepresentativiteit inzichtelijk te maken zijn er voortschrijdende tijdreeksmodellen gekalibreerd op meetperiodes van 8 jaar. Vervolgens is de GxG zoals eerder beschreven, bepaald op basis van een simulatie van 30 jaar. De simulatieperiode is voor iedere kalibratie gelijk genomen. De resultaten voor de drie meetpunten zijn weergegeven in aanhangsel 2.

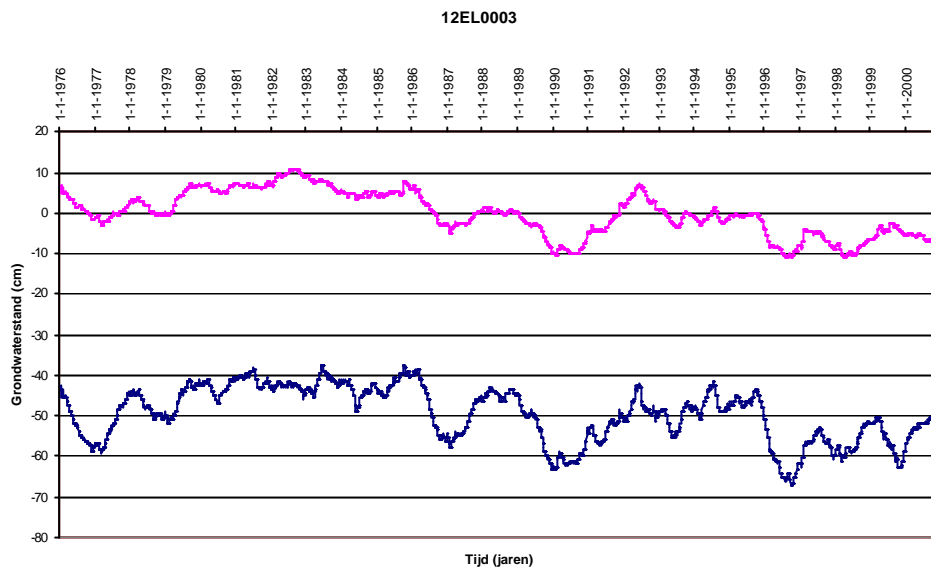
In figuur 5 zijn beide methoden voor het natte meetpunt naast elkaar gezet. De gegevens laten een daling zien van de GxG over 8 jaar, indien gekeken wordt naar de voortschrijdende GxG. Mogelijk duidt deze daling op een dalende trend. Daarnaast is te zien dat de GHG op basis van de tijdreeks structureel hoger is dan de GHG op

basis van de meetgegevens. Voor de GLG liggen de tijdreeksresultaten structureel lager dan de GLG op basis van de metingen.



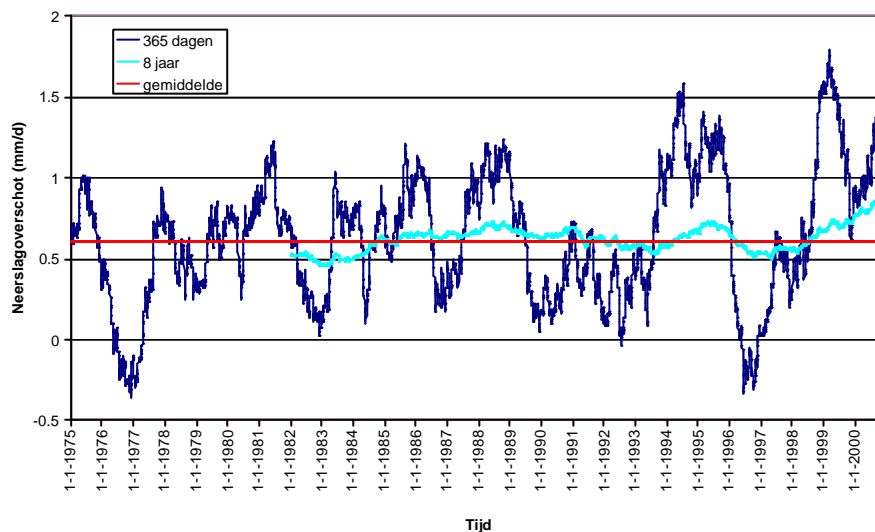
Figuur 5 GxG berekend op basis van metingen (m) en tijdreeksanalyse (t) voor meetpunt 12EL0003.

In figuur 6 is het voortschrijdend gemiddelde weergegeven van de grondwaterstand en de residuen op basis van een tijdreeksmodel gekalibreerd op een periode van iets minder dan 30 jaar (aanhangel 3). Het voortschrijdend gemiddelde is bepaald voor een periode van 1 jaar. Er is opvallend veel overeenkomst tussen het voortschrijdend gemiddelde van de residuen en de grondwaterstand voor deze locatie. Natte perioden geven hogere grondwaterstanden en positieve residuen, terwijl droge perioden negatieve residuen laten zien. Er lijkt een geringe dalende trend in de residuen te zitten. De overeenkomst in het verloop van het voortschrijdend gemiddelde geeft wellicht de verklaring van de onder- en overschatting van de respectievelijk de GLG en de GHG.



Figuur 6 Voortschrijdend gemiddelde over 365 dagen van de grondwaterstand en de residuen.

Ook in het neerslagoverschot is een fluctuatie te zien indien gekeken wordt naar het voortschrijdende gemiddelde over 365 dagen en 8 jaar (figuur 7 en aanhangsel 4).

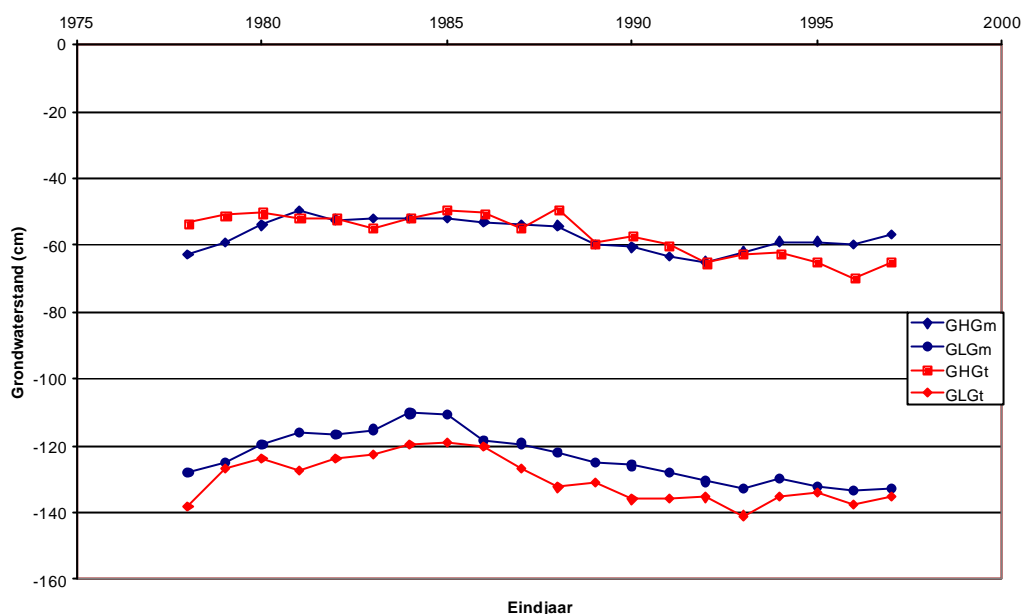


Figuur 7 Voortschrijdend gemiddelde van het neerslagoverschot over 365 dagen en 8 jaar ten opzichte van het langjarige gemiddelde voor een meteorstation nabij 12EL0003.

Deze analyse is ook uitgevoerd voor een meer gemiddeld grondwaterstandsmeetpunt. In figuur 8 is de fluctuatie als gevolg van drogere en natte jaren goed te zien. Er lijkt geen structurele verdroging te zijn voor dit meetpunt aangezien de berekende Gt over de eerste 8 jaar en over de laatste 8 jaar dicht bij het gemiddelde over 27 jaar ligt (aanhangel 1). Ook de berekende residuen (aanhangel 3) geven geen duidelijke trend aan. In de tussenliggende jaren is er een fluctuatie rond het gemiddelde te zien. Indien gekeken wordt naar de analyse van de voortschrijdende

tijdreeksresultaten is er ook een fluctuatie te zien rond het gemiddelde (aanhangel 2). In figuur 8 zijn de resultaten voor beide analyses voor dit meetpunt weergegeven. In de voortschrijdende GxG op basis van de metingen en op basis van de tijdreeksanalyse is een fluctuatie te zien als gevolg van droge en natte jaren. Bij de tijdreeksresultaten lijkt de fluctuatie enigszins afgevlakt. Toch lijkt een klimaatrepresentatieve GxG op basis van een kalibratie voor 8 jaar moeilijk te voorspellen. Een mogelijke verklaring hiervoor is het gebruik van lineaire tijdreeksmodellen, die voornamelijk gefit worden op 'het zwaartepunt' in de kalibratiedata. Dit heeft vermoedelijk tot gevolg dat de gekalibreerde tijdreeksparameters het beste passen bij het gemiddelde van de kalibratiedata. Indien de processen die de grondwaterstand beïnvloeden niet-lineair zijn, kan kalibratie op relatief natte of droge jaren verschillende uitkomsten geven bij langjarige simulaties.

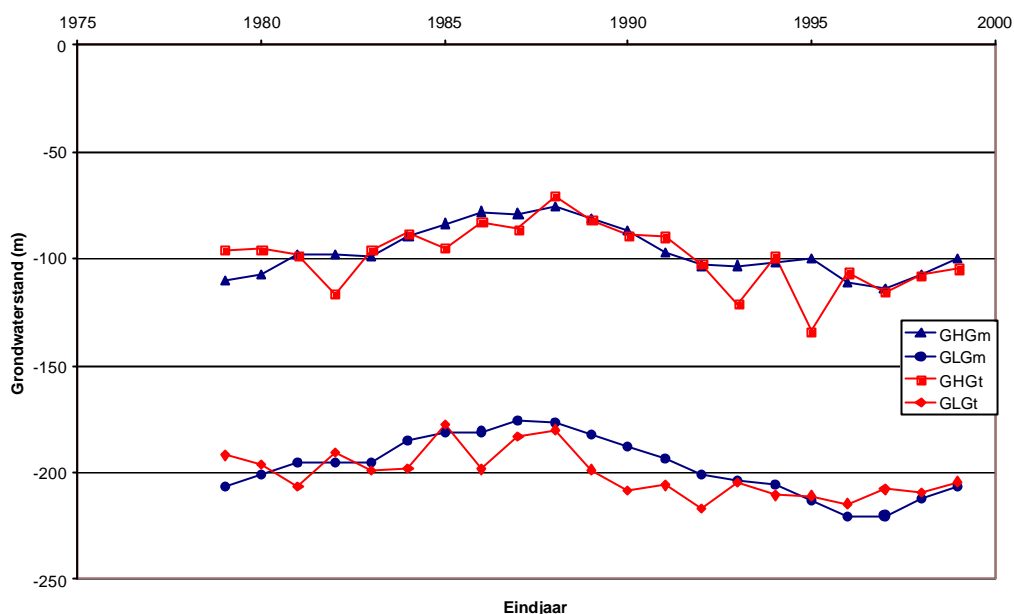
De GLG op basis van de tijdreeks ligt evenals bij het vorige meetpunt structureel lager. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen zijn de niet-lineaire processen zoals drainage en berging. Drainage vindt plaats naar nabijgelegen ontwateringsmiddelen die elk hun eigen drainagebasis hebben. Rond de meest voorkomende grondwaterstand zijn een aantal waterlopen in de omgeving watervoerend en drainerend voor het desbetreffende meetpunt. Indien bij de kalibratie de parameters worden gefit, die passen bij deze situatie, wordt geen rekening gehouden met bijvoorbeeld het droogvallen van waterlopen in drogere situaties, waarbij sterke niet-lineaire effecten kunnen voorkomen. Als gevolg van het droogvallen kan de drainageweerstand sterk stijgen waardoor de afvoer en de daarmee samenhangende daling van de grondwaterstand wordt afgeremd. Indien bij een tijdreeks-simulatie hiermee geen rekening wordt gehouden en dezelfde parameters worden gebruikt blijft de gekalibreerde drainageweerstand gelijk, waardoor de drainage en daling van de grondwaterstand voor het desbetreffende punt in droge perioden te groot kan zijn. Hierdoor kunnen de lage grondwaterstanden te laag gesimuleerd worden, waardoor de gesimuleerde GLG structureel onder de gemeten GLG uit kan komen. Omgekeerd kan dit ook gelden voor de GHG. Indien de drainageweerstand te hoog wordt ingeschat voor natte situaties kan het water in de simulatie niet voldoende draineren, waardoor de GHG structureel te hoog kan worden ingeschat.



Figuur 8 GxG berekend op basis van metingen (m) en tijdreeksanalyse (t) voor meetpunt 34DP0155.

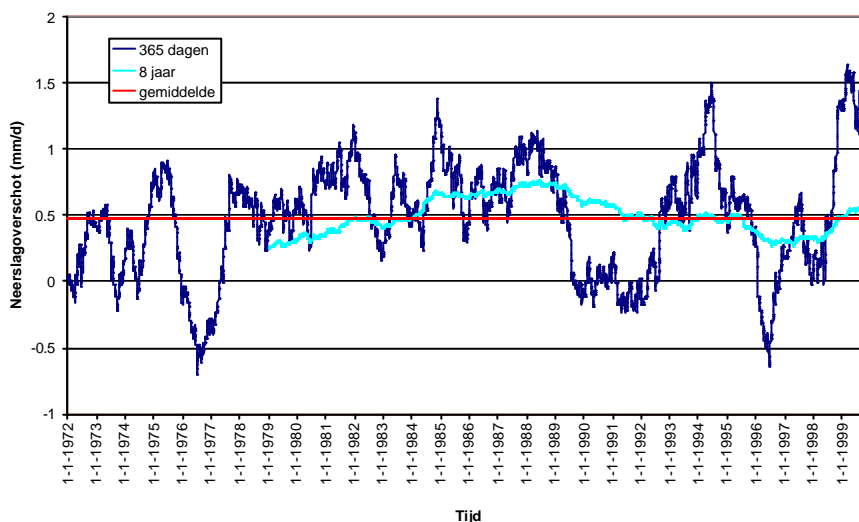
Het derde meetpunt betreft een relatief droog meetpunt. In figuur 9 zijn de resultaten voor de GxG op basis van de meetgegevens en de tijdreeks weergegeven. In de figuur is voor de GxG op basis van de metingen wederom een mooie fluctuatie rond het gemiddelde te zien als gevolg van droge en natte weerjaren. Ook op dit meetpunt lijkt er geen structurele verdroging te zijn.

Ook voor de GxG op basis van de voortschrijdende tijdreeksen is wederom een fluctuatie van de GxG te zien. De fluctuatie rond het langjarig gemiddelde is echter niet gelijkmatig maar vertoont een enigszins piekerig verloop. De variatie op basis van de metingen is veel gelijkmatiger dan de variatie van de GxG op basis van de tijdreeksanalyse. Het piekerige verloop van de GxG op basis van de tijdreeksanalyse is niet logisch. De overlap tussen twee opeenvolgende punten is immers 7 van de 8 kalibratiejaren. De piekerigheid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een grote gevoeligheid van de gekalibreerde parameters voor de meetgegevens. Een geringe afwijking in de impuls respons kan dit wellicht verklaren. Voor de eindjaren 1982, 1993 en 1995 is de gekalibreerde autoregressie parameter erg laag (< 0.9). Dit betekent dat de grondwaterstand van de vorige dag geen hoge verklaring geeft voor de grondwaterstand. Het tijdreeksresultaat is voor deze jaren niet realistisch. Kennelijk is vooral de relatief droge locatie gevoelig voor de meetgegevens.



Figuur 9 GxG berekend op basis van metingen (m) en tijdreeksanalyse (t) voor meetpunt 52GL0023.

De fluctuatie van de berekende GxG over 8 jaar vertoont grote overeenkomst met het voortschrijdend gemiddelde van het neerslagoverschot over 8 jaar (figuur 10).



Figuur 10 Voortschrijdend gemiddelde van het neerslagoverschot over 365 dagen en 8 jaar ten opzichte van het langjarige gemiddelde voor een meteostation nabij 52GL0023.

In tabel 1 is een overzicht van de resultaten voor de drie meetpunten weergegeven. De resultaten geven aan dat er een duidelijke beïnvloeding van het neerslagoverschot is op de berekende GHG en GLG. Ook bij het gebruik van tijdreeksen is de fluctuatie van de berekende klimaatsrepresentatieve GHG en GLG al snel enkele centimeters. De tijdreeksresultaten geven een geringe standaarddeviatie. De

berekende standaarddeviatie neemt toe naarmate het meetpunt droger is. Uit de analyse blijkt dat de standaarddeviatie groter is indien deze wordt gebaseerd op voortschrijdend gekalibreerde tijdreeksmodellen. Het hoger uitvallen van de onzekerheid wordt veroorzaakt doordat er bij de tijdreeksanalyse geen rekening is gehouden met de onzekerheid van het gekalibreerde model. Uit de analyse voor de drie meetpunten blijkt dat een klimaatrepresentatieve Gt moeilijk eenduidig is te voorspellen met lineaire tijdreeksmodellen.

Tabel 1 Overzicht van de resultaten voor de drie meetpunten

Meetpunt	12EL0003		34DP0155		52GL0023	
Tijdreeksresultaat op basis van de gehele meetperiode (± 30 jaar) (cm)						
	waarde	std	waarde	std	waarde	std
GHG	-20.5	1.0	-58.0	2.2	-98.8	3.0
GVG	-48.2	1.4	-90.5	2.6	-119.9	3.0
GLG	-76.4	1.2	-135.6	2.5	-203.9	2.8
Analyseresultaat op basis van de voortschrijdende 8 jaarse perioden (cm)						
	Metingen	tijdreeks	Metingen	tijdreeks	metingen	tijdreeks
GHG	-21.4	-20.5	-57.5	-58.0	-98.4	-96.0
GHGmin	-26.1	-26.0	-65.0	-69.8	-114.0	-133.9
GHGmax	-17.5	-14.2	-49.7	-49.2	-75.7	-70.5
GHGstd	2.6	3.2	4.6	6.4	11.7	14.8
GLG	-71.7	-76.4	-125.9	-135.6	-199.0	-192.1
GLGmin	-79.6	-81.3	-133.6	-141.0	-220.9	-216.8
GLGmax	-64.6	-70.3	-110.4	-119.0	-175.9	-177.6
GLGstd	5.2	4.3	7.5	6.9	13.7	11.0

3.2.3 Het effect van meteostations

Naast het effect van verschillende kalibratieperiodes is gekeken naar het effect van verschillende meteostations. Om inzicht te krijgen in het effect van ruimtelijke meteorologische verschillen op de GxG zijn alle meteostations in een straal van 20 kilometer rond een buis geselecteerd en gebruikt voor de kalibratie van tijdreeksen. De geselecteerde meteostations kunnen verschillen in neerslagintensiteit en verdeling. Voor de verdamping zijn maar enkele meteostations beschikbaar. In de onderstaande tabel (tabel 2) zijn de resultaten weergegeven. Voor alle meteostations binnen een straal van 20 kilometer zijn tijdreeksen gekalibreerd op een periode van 8 jaar. De 8 jaarperiode komt overeen met de laatste meetperiode van 8 jaar uit de voorgaande analyse.

De verschillen in de GxG tussen de verschillende tijdreeksen bedragen enkele centimeters. De verschillen en de standaarddeviatie zijn klein in vergeleken met het gebruik van andere kalibratieperiodes zoals beschreven in de vorige paragraaf. Kennelijk hebben temporele verschillen in meteorologische omstandigheden meer effect op de berekende GxG dan ruimtelijke verschillen in meteorologische gegevens.

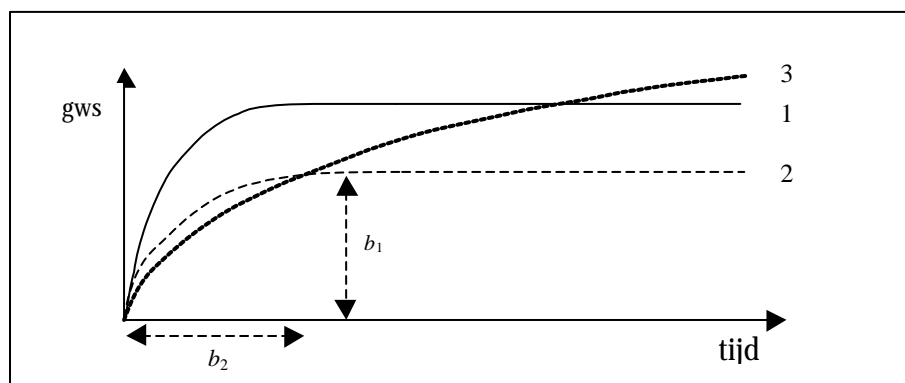
Tabel 2 Overzicht van de resultaten van de tijdreeksanalyse bij het gebruik van meerdere meteostations.

Meetpunt	12EL0003	34DP0155	52GL0023
	Tijdreeks	Tijdreeks	Tijdreeks
	N=9	N = 6	N= 7
GHG	-26.0	-65.1	-104.7
GHGmin	-26.6	-65.4	-108.9
GHGmax	-23.7	-63.5	-101.4
GHGstd	0.8	0.7	2.7
GLG	-81.2	-135.4	-204.3
GLGmin	-81.2	-136.9	-206.4
GLGmax	-78.8	-134.3	-202.1
GLGstd	0.7	0.9	1.7

N is het aantal meteostations binnen een straal van 20 km

3.3 Fysische interpretatie van tijdreeksparameters

Voor een grondwaterstand die gedurende het jaar varieert door het neerslagoverschot (neerslag minus verdamping) is het niet alleen van belang dat de gemiddelde grondwaterstand representatief is, maar ook dat er op die locatie sprake is van een representatieve grondwaterdynamiek. Een goede maat voor de dynamiek van een grondwaterstand die voornamelijk afhankelijk is van het neerslagoverschot is de responskarakteristiek (Lankester en Maas, 1996). Een grondwaterstand reageert op een bepaalde manier op een neerslaggebeurtenis. In figuur 11 zijn een aantal responskarakteristieken schematisch weergegeven. Stel dat we te maken hebben met een vlakke grondwaterspiegel. Op $t=0$ gaat het regenen met een constante intensiteit van 1 mm per tijdseenheid. We meten hoe de grondwaterstand naar zijn eindwaarde stijgt. De parameter b_1 geeft aan hoe hoog de grondwaterstand uiteindelijk zal stijgen. Deze is voor gebieden met grotere drainageweerstanden groter dan gebieden met kleine drainageweerstanden. De parameter b_2 geeft de traagheid van het systeem weer. Hoe groter de berging of hoe groter de drainageweerstand, des te trager het systeem. Curve 1 zou kunnen gelden voor een goed gedraineerde kleigrond, curve 2 voor een goed gedraineerde zandgrond en curve 3 voor een open zandgrond ver van een waterloop (bijv. dekzandrug met GT VII).



Figuur 11 Responskarakteristieken van de grondwaterstand op het neerslagoverschot (Bierkens en Massop, 2000)

Dus naast de gemiddelde grondwaterstand h_{gem} kan de mate van gelijkheid van grondwaterregime worden afgeleid uit de parameters b_1 en b_2 .

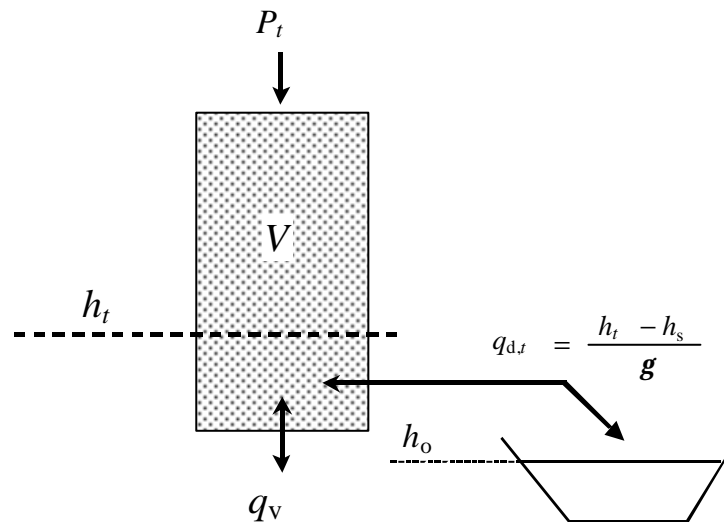
De grondwaterstand als functie van het neerslagoverschot op een locatie kan meestal goed worden gemodelleerd met het volgende model (Knotters en Bierkens, 1998):

$$h_t = c + \mathbf{d}(h_{t-\Delta t} - c) + \mathbf{w}P_t \quad (1)$$

Hierbij is h_t de grondwaterstand op tijdstip t (cm mv), c is de basisgrondwaterstand (cm mv) (dat is de grondwaterstand die zou optreden als het neerslagoverschot voor langere tijd gelijk aan 0 zou zijn³), t de tijd (dagen), Δt de discrete tijdstap (dagen) en P_t het cumulatieve neerslagoverschot (cm) over tijdstap $[t - \Delta t, t]$. De parameters \mathbf{d} en \mathbf{w} bepalen de grondwaterdynamiek. Deze parameters zijn één op één verwant met de parameters b_1 en b_2 van de responsiekarakteristiek (Bierkens e.a., 1998; Knotters en Bierkens, 1999):

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= \exp\left(\frac{-3\Delta t}{b_2}\right) & \Leftrightarrow & \quad b_2 = \frac{-3\Delta t}{\ln(\mathbf{d})} \\ \mathbf{w} &= b_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-3\Delta t}{b_2}\right) \right] & \Leftrightarrow & \quad b_1 = \frac{\mathbf{w}}{1 - \mathbf{d}} \end{aligned} \quad (2)$$

Dus in plaats van het gebruik van b_1 en b_2 zouden we ook \mathbf{d} en \mathbf{w} kunnen gebruiken. Deze parameters zijn meer herkenbaar en zijn ook de tijdreeksanalyse bekend.



Figuur 12 Schematische weergave van de waterbalans van een grondkolom (Bierkens en Bron, 2000)

Overigens geldt voor model (1) dat de parameters \mathbf{d} en \mathbf{w} niet alleen de respons van de grondwaterstand op het neerslagoverschot bepalen, maar ook de respons op een

³ Als er geen kwel of infiltratie is dan is c gelijk aan de oppervlaktewaterstand. In geval van kwel is c groter dan de oppervlaktewaterstand, in geval van infiltratie kleiner (zie vergelijking 3).

verandering van het oppervlaktewaterpeil. Dit kan als volgt worden afgeleid. Door een waterbalans van de bodem en het ondiepe grondwater op te stellen kunnen de parameters c , d en w gerelateerd worden aan de meer bekende fysische parameters drainageweerstand g , effectieve bergingscoëfficiënt m de oppervlaktewaterstand h_0 en de kwel/infiltratieflux q_v (Knotters en Bierkens, 1999):

$$\begin{aligned} d &= \exp\left(\frac{-\Delta t}{mg}\right) \\ w &= g(1-d) \\ c &= gq_v + h_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Stel nu dat het oppervlaktewaterpeil niet constant is, maar verandert in de tijd. Als we in vergelijking (1) invullen $c = gq_v + h_{0,t}$ met $h_{0,t}$ de in de tijd variërende oppervlaktewaterstand dan resulteert dit in:

$$h_t = (1-d)gq_v + dh_{t-\Delta t} + (1-d)h_{0,t} + wP_t \quad (4)$$

Vergelijking (4) geeft aan dat de reactie van de grondwaterstand op een verandering van de oppervlaktewaterstand bepaald wordt door dezelfde parameter d die op zijn beurt weer afhangt van de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt (zie vergelijking 3). We kunnen dus concluderen dat de parameters d en w de respons bepalen van de grondwaterstand op zowel het neerslagoverschot als het oppervlaktewaterpeil.

Bij het gebruik van KALTFN kan men een fysische interpretatie maken van de gekalibreerde tijdreeksparameters. Het deterministische gedeelte van KALTFN ziet er als volgt uit (h_t is de grondwaterstand en P_t het neerslagoverschot op tijdstip t):

$$h_t = c + a[h_{t-1} - c] + bP_t$$

Indien men er van uitgaat dat het drainageniveau h_0 (ten opzichte van maaiveld) constant is, dan kunnen de drainageweerstand g [T], de effectieve bergingscoëfficiënt m [-] en de onderrandflux (kwel/infiltratie) q_v [LT⁻¹] uit de parameters a , b en c en de tijdstap Δt als volgt worden berekend (Knotters en Bierkens, 1999):

$$g = \frac{b}{1-a} \quad m = \frac{-\Delta t}{g \ln a} \quad q_v = \frac{c - h_0}{g}$$

In aanhangsel 5 is de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt voor de drie meetpunten weergegeven. In de figuren is te zien dat de fysische parameters variëren, afhankelijk van de gebruikte kalibratieperiode. Daarnaast is te zien dat de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt deels uitwisselbaar zijn. Bij een kalibratie resultaat met een hogere drainageweerstand is de bergingscoëfficiënt relatief klein. Dit kan wellicht verklaard worden aan de hand van de fluctuatie van de grondwaterstand. Bij een grotere waarde voor de bergingscoëfficiënt neemt de

fluctuatie van de grondwaterstand af. Om toch de gemeten fluctuatie te kunnen beschrijven met een model zal de drainageweerstand moeten afnemen, zodat het geborgen water weer relatief snel tot afvoeren komt. Ook deze analyse geeft aan dat temporele verschillen in meteorologische omstandigheden de kalibratieresultaten van lineaire tijdreeksen kan beïnvloeden.

4 Grondwaterkarakteristiek op basis van stambuisregressie

4.1 Methode

4.1.1 Gerichte opnamen

Bij de benadering van de GxG met gerichte opnamen werd voorheen verondersteld dat de grondwaterstand in gronden met gelijke Gt's en fluctuatie van de grondwaterstand, overal op hetzelfde tijdstip op het niveau van de GHG of de GLG zou zijn. Het tijdstip waarop dit het geval was werd vastgesteld bij een of enkele stambuizen. Op dat tijdstip werden een groot aantal boorgaten bemeten. Een zwak punt van deze methode was dat er van uitgegaan werd dat het gebied 'hydrologisch homogeen' zou zijn. Hierbij werd verondersteld dat de grondwaterstand zich overal gelijktijdig op het niveau van de GHG en GLG bevond. Dit impliceert dat de grondwaterstanden binnen het beschouwde gebied overal synchroon verlopen. Door verschillen in bergingsvermogen, doorlatendheid, dichtheid van het ontwateringssysteem en geo(hydro)logische opbouw van de ondergrond kunnen al op relatief korte afstand meer of minder grote verschillen in het grondwaterstandsverloop voorkomen. Zo hebben natte gronden een geringe berging, doorgaans een dicht ontwateringssysteem en vaak kwel. Hierdoor reageren natte gronden veelal sterker op neerslag en verdamping dan droge gronden. Dit betekent dat het uitgangspunt van de gerichte opname, het alom gelijktijdig bereiken van het GHG en GLG niveau, zich lang niet overal voordoet (ten Cate et al., 1995). Hierom is de methode aangepast, door uit te gaan van een set van stambuizen die de belangrijkste variatie in hydrologische omstandigheden (geohydrologie en ontwateringsniveau) representeren. Dit wil zeggen dat er gebruik wordt gemaakt van een stambuizenset die alle Gt's omvat. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat eenzelfde Gt door verschillende omstandigheden kan voorkomen. Een natuurlijke Gt VI zal anders reageren op neerslag dan een Gt VI als gevolg van buisdrainage.

4.1.2 Grondwaterkarakteristiek

Om de gemeten grondwaterstanden te transformeren naar xG3-95 en GxG is gebruik gemaakt van stambuisregressie. Bij de stambuisregressie wordt op basis van metingen in meerdere buizen een regressiemodel opgezet (te Riele en Brus, 1991). Op de tijdstippen van de gerichte opnames zijn ook grondwaterstanden gemeten in een aantal peilbuizen waarvan de xG3-95 en GxG zijn berekend. Deze peilbuizen liggen idealiter in de directe omgeving van de meetpunten, en vertegenwoordigen samen alle grondwatertrappen. In de praktijk worden op een bepaalde meetdag uitgestrekte gebieden bemeten, en ligt de set peilbuizen die samen alle grondwatertrappen vertegenwoordigd ook over een groot gebied verspreid. Het aantal peilbuizen waarin per meetdag wordt gemeten varieert tussen de 15 en 45. Hiermee is het mogelijk om op basis van deze buizen voor de dag van de gerichte opname een regressierelatie te bepalen tussen de op die dag gemeten

grondwaterstand en de berekende xG3-95 en GxG. De regressierelatie heeft de volgende algemene vorm:

$$xG = b_0 + b_1 \cdot x_1 + e$$

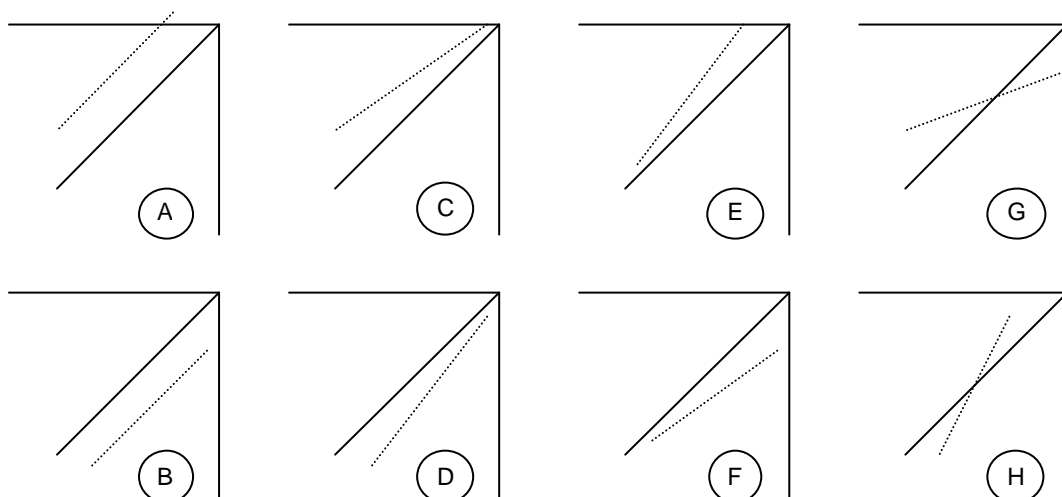
waarbij x_1 de wintergrondwaterstand of de zomergrondwaterstand is en xG de HG3, LG3, GHG of GLG in een peilbuis is; b_i ($i=0, 1$) zijn de regressieparameters en e is de fout bij de regressie.

Om inzicht te verkrijgen in de mogelijke relaties tussen een gemeten stand op een dag en de berekende xG3-95 en GxG, zijn in aanhangsel 6 de relaties weergegeven voor 24 meetdata in 1995. Voor het opzetten van de relaties is gebruik gemaakt van 99 stambuislocaties in één deelgebied (het centrale deel van Overijssel), waarvoor de tweemaandelijks metingen op de 14 en de 28 van de maand zijn uitgezet tegen de xG3-95 en de GxG. Om eventuele problemen met ontbrekende gegevens en verschillende meetdata te voorkomen zijn de gegevens gegenereerd op basis van tijdreeksanalyse met updating⁴. Voor de HG3-95 zien vooral de relaties met meetdata in de eerste twee maanden van het jaar er goed uit. Het voorkomen van goede relaties mag ook verwacht worden aangezien 3 van de meetdata in het kalenderjaar 1995 ook gebruikt zijn voor de bepaling van de HG3-95. De verwachte goede relaties liggen echter allemaal in het begin van het jaar. De laatste wintermaanden van het jaar blijken niet representatief voor de natte HG3-95. Voor de LG3 zijn de goede relaties te vinden in de tweede helft van het jaar. Ook voor de LG3-95 geldt dat drie van deze metingen gebruikt zijn voor de LG3, waardoor een goede relatie voor een aantal meetdata mag worden verwacht.

Indien gekeken wordt naar de relatie met de GHG en de GLG zijn de relaties minder sterk. Ook in de maanden dat er bij de xG3-95 goede relaties zijn, kunnen bij de relaties tussen de meetdata en de GxG grote uitschieters voorkomen. Vooral bij de GHG zijn enkele uitschieters te zien die bij de relatie met de HG3 niet voorkomen. De winter 1994-1995 was extreem nat. Hierdoor is de HG3 voor het kalenderjaar 1995 relatief hoog. De reactie op een extreme situatie hoeft niet voor ieder punt gelijk te zijn. Wellicht zijn de eerste maanden van 1995 te extreem om de GHG te verklaren.

In figuur 13 zijn de situaties die voor kunnen komen bij de enkelvoudige stambuisregressie schematisch weergegeven. Het betreft de mogelijke relaties tussen een meetdatum en de voorspelling van de xG. (x-as meting, y-as voorspelling). De situaties zijn weergegeven ten opzichte van de 1 op 1 lijn. Indien op een meetdatum de te natte of te droge omstandigheden overal gelijktijdig en in gelijke mate voordoen zouden we een lijn zien welke parallel aan de 1 op 1 lijn loopt (situatie A meetdatum droger, Situatie B meetdatum natter). In tabel 3 is de situatie weergegeven van de meetdatum voor de mogelijke relaties uit figuur 13.

⁴ Updating is de term die gebruikt wordt voor het bijstellen van de gesimuleerde tijdreeks op tijdstippen dat er een meting beschikbaar is.



Figuur 13 Mogelijke relaties tussen de stand op een meetdatum en de GxG.

Tabel 3 Verschil van de metingen tov GxG

A Te droog	C Lage gws te droog	E Hoge gws te droog	G Hoog te nat Laag te droog
B Te nat	D Lage gws te nat	F Hoge gws te nat	H Hoog te droog Laag te nat

Door verschillen in bergingsvermogen, doorlatendheid, dichtheid van het ontwateringssysteem, ontwateringsdiepte en geo(hydro)logische opbouw van de ondergrond kan de grondwaterstandsfluctuatatie verschillen, waardoor de relatie niet meer parallel aan de 1 op 1 lijn verloopt.

Een variant op de bovenstaande methode is het bepalen van de relatie tussen zowel de zomer- als de wintergrondwaterstand enerzijds als de GHG (of GVG of GLG) anderzijds. Deze multiple regressie relatie heeft de volgende algemene vorm:

$$GxG = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + e$$

waarbij x_1 de wintergrondwaterstand is, x_2 de zomergrondwaterstand en GxG de GHG, GVG of GLG in een peilbuis; b_i ($i=0, 1$ of 2) zijn de regressieparameters en e is de fout bij de regressie. Bij het gebruik van deze methode wordt eerst bepaald welk model voor de voorspelling van de GxG het best is: een van de twee modellen gebaseerd op 1 gemeten stand (in dat geval geldt: $b_2=0$) of het model gebaseerd op 2 gemeten standen. Bij de selectie van de mogelijke regressiemodellen wordt gebruik gemaakt van het Mallows' Cp criterium⁵ (Oude Voshaar, 1994). Modellen met een Cp kleiner dan $(p+3)$ worden geselecteerd. Van deze modellen worden de modellen met het kleinste aantal parameters geselecteerd. Indien er dan nog meerdere modellen resteren, wordt het model met de kleinste restvariantie gekozen.

⁵ $Cp = SS_{res}/s^2 - n + 2p$ waarin: SS_{res} de kwadraatsom van de fouten van het model is, n het aantal observaties waarop dit model is gebaseerd en p het aantal regressiecoëfficiënten (inclusief de regressieconstante). s^2 is de MS_{res} van het complete model (met alle predictoren).

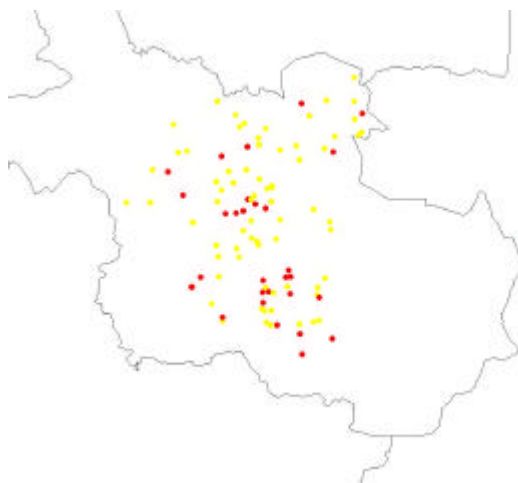
Deze geselecteerde relatie wordt dan toegepast op de gemeten grondwaterstanden in boorgaten van de gerichte opname, hetgeen resulteert in een voorspelling van de GxG. Ook de onzekerheid van deze voorspelling wordt berekend met de variantie van de voorspelfout.

Bij het toepassen van de regressievergelijking kunnen er 2 bijzondere omstandigheden optreden. Deze omstandigheden en hoe daarmee wordt omgegaan worden hieronder kort geschetst.

1. De gemeten grondwaterstand in een boorgat is dieper dan de maximale boordiepte van 2,50 meter. In dat geval spreekt men van een “gecensureerde waarneming”: de precieze waarde is onbekend, maar wel is bekend dat de waarneming “dieper dan” een grenswaarde is. Na detectie van een gecensureerde waarneming wordt eerst een zgn. *maximum likelihood* schatting gemaakt van de grondwaterstand. Daarbij wordt de “dieper dan” informatie vervangen door de meest waarschijnlijke diepte groter dan boordiepte. Dit getal wordt vervolgens ingevoerd in de regressievergelijking. De check op gecensureerde waarnemingen en de vervanging met het meest waarschijnlijke getal is standaard ingebouwd in het PUNTGxG-PROGRAMMA waarmee de GxG kan worden voorspeld.
2. De in het veld gemeten standen zijn veel natter of droger dan de standen die in de OLGA-peilbuizen zijn gemeten. Dit verschijnsel heet “extrapolatie” en kan met behulp van een statistisch criterium worden gesignaleerd. In dat geval wordt de voorspelling niet meegenomen.

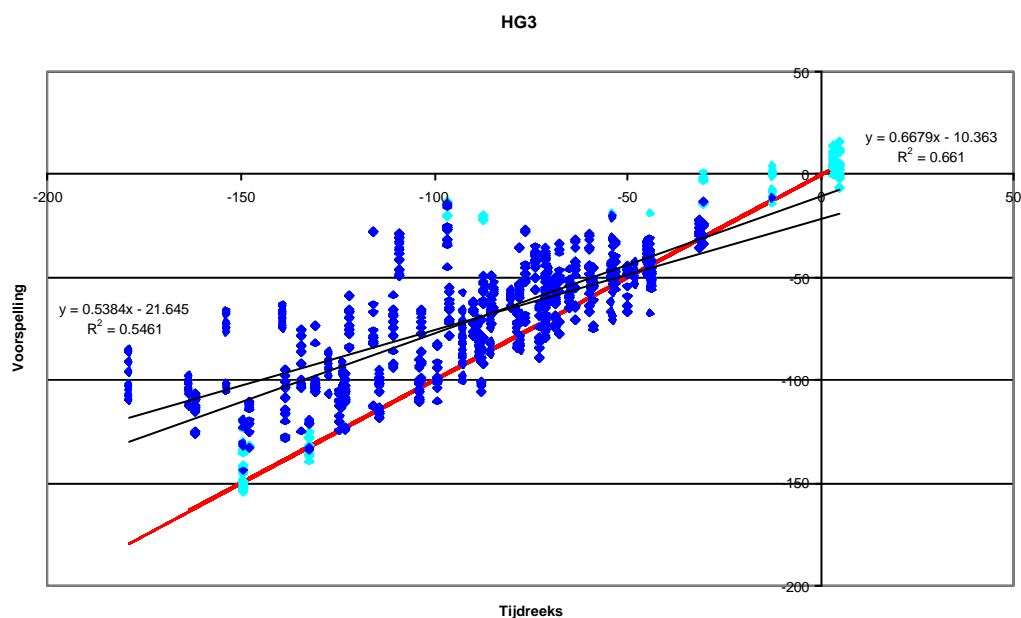
4.2 Gevoeligheid van de stambuisregressie

De onzekerheid van de xG3 op de locaties met een gerichte opname wordt bepaald op basis van de regressierelatie. Om meer inzicht te krijgen in de stambuisregressie en de berekende onzekerheid is deze nader onderzocht. In het centrale gebied van de provincie Overijssel zijn een groot aantal stambuizen beschikbaar. Uit een totale set van 99 stambuizen zijn random 29 buizen geselecteerd. De overige 70 locaties zijn gebruikt als validatiepunten (figuur 14). De 29 random geselecteerde buizen vormen de stambuizen-set, terwijl de overige 70 locaties gezien kunnen worden als gerichte opname-meetpunten. Voor deze locaties zijn de standen op de 14° en de 28° van de maand beschikbaar. Op basis van de analyse in de vorige paragraaf kan geconcludeerd worden dat de voorspelling van de xG afhankelijk is van de meetdatum. Dit aspect is nader onderzocht door de xG meerdere malen te voorspellen. Voor de wintergrondwaterstanden is uitgegaan van 8 meetdata te weten de twee maandelijks metingen (14° en 28°) voor de maanden januari t/m april. Voor de zomermeting is eveneens uitgegaan van 8 mogelijke metingen in de maanden juli t/m oktober.



Figuur 14 Overzicht van de stambuislocaties in het centrale deel van Overijssel.

In de onderstaande figuur (figuur 15) zijn de resultaten van de 64 (8 winterwaarden x 8 zomerwaarden = 64) voorspellingen van de HG3 voor 70 locaties te zien. De HG3 is voorspeld op basis van het beste model dat is afgeleid uit de 29 geselecteerde buizen. In de figuur is duidelijk te zien dat er een grote variatie is in de voorspelde HG3. Doordat er gebruik is gemaakt van meerdere meetdata voor de voorspelling van de HG3, kunnen er verticale rijen van punten ontstaan. De verticale rijen hebben dus betrekking op eenzelfde locatie waar meerdere voorspellingen (64) voor zijn gedaan. De meetdatum of combinatie van winter en zomermeting zijn in hoge mate bepalend voor de voorspelde HG3.



Figuur 15 Relatie tussen de HG3 gebaseerd op tijdreeksmodellering (met updating) en de voorspelde HG3 gebruikmakend van stambuisregressie op basis van meerdere meetdata. (licht gekleurde punten voldoen niet aan het extrapolatiecriterium).

In figuur 15 is tevens te zien dat de voorspelde HG3's afwijken van de 1 op 1 lijn (rode lijn), welke men zou verwachten. Naast de 1 op 1 lijn zijn twee regressielijnen bepaald. De steilste regressielijn is de lijn die is bepaald door gebruik te maken van alle voorspelde HG3's. De regressie heeft betrekking op 64 voorspellingen (8*8) op 70 locaties (dus n=4480). Bij de vlakker verlopende lijn is rekening gehouden met het extrapolatiecriterium en zijn de voorspellingen die niet voldoen aan het extrapolatiecriterium buiten beschouwing gelaten (de lichtblauwe punten zijn dus niet meegenomen). Indien rekening gehouden wordt met het extrapolatiecriterium is het bereik van de voorspellingen geringer. De voorspellingen waarbij wordt geëxtrapoleerd liggen over het algemeen in het uiterste bereik van het gemeten grondwaterstandstraject. De hellingshoek van de regressielijnen is geringer dan 45 °, wat betekent dat de uitersten minder goed worden voorspeld. Dit heeft tot gevolg dat de voorspelde xG3's een geringe spreiding hebben en de voorspelde waarden enigszins worden afgevlakt in de richting van het gemiddelde. Deze afvlakking wordt ook wel 'regression to the mean' genoemd en is het gevolg van het feit dat voorspellingen naar het midden toe worden getrokken doordat de regressielijn vlakker verloopt naarmate de relatie zwakker is. Deze afvlakking naar het gemiddelde is voor de gemiddeld hoogste grondwaterstand veel sterker dan voor de gemiddeld laagste grondwaterstand (zie aanhangsel 7).

5 Resultaten

5.1 Grondwaterstandsbuizen

De resultaten van de tijdreeksanalyse zijn voor alle buizen verzameld, waarna ze konden worden geanalyseerd. De uiteindelijke selectie van de buizen heeft plaatsgevonden op basis van enkele selectiecriteria die aangeven of de tijdreeksresultaten plausibel zijn. Bij de selectie zijn de volgende criteria gebruikt:

- Periode met meetgegevens van grondwaterstanden moet liggen binnen de periode met beschikbare meteogegevens;
- Het aantal grondwaterstandmetingen moet minimaal 60 bedragen, dit komt overeen met ongeveer 2,5 meetjaar uitgaande van een optimale meetfrequentie van 24 metingen per jaar;
- De berekende GHG moet dieper zijn dan 0,5 m boven maaiveld;
- De berekende GHG en GLG moeten beide liggen binnen het bereik van de gemeten grondwaterstanden in de buis;
- De overschrijdingsduur van de GHG, bepaald op basis van de deterministische trace⁶ met updating, moet liggen tussen 5 en 40 dagen.

5.2 Gerichte opnamepunten

In het kader van de Gt-actualisatie zijn op een groot aantal locaties gerichte opnamen uitgevoerd. De gerichte opnamen zijn op projectbasis uitgevoerd en mede daardoor onderverdeeld in gebieden. In figuur 16 is de onderverdeling van de Gt-actualisatiegebieden weergegeven. Vooralsnog wordt de Gt-actualisatie alleen uitgevoerd in de zandgebieden. De stuwwallen, met veelal zeer diepe grondwaterstanden, zijn buiten beschouwing gelaten. Ook het tertiaire plateau in Oost Nederland bij Winterswijk is bij de Gt-actualisatie buiten beschouwing gelaten. Voor elk van de onderscheiden gebieden is er minimaal één stambuizenset samengesteld om de gemeten zomer- en winterstand van de gerichte opnamepunten te kunnen transformeren naar een xG3 en GxG.

⁶ Een deterministische trace is een tijdreeks simulatie, waarbij alleen gebruik wordt gemaakt van het deterministische deel van de gekalibreerde tijdreeksparameters.



Figuur 16 Overzicht van de gebieden van de Gt-actualisatie

5.2.1 Extrapolatie

Bij toepassing van regressieanalyse wordt een regressiemodel opgezet dat gebaseerd is op een aantal metingen die een beperkt bereik hebben. Indien de metingen die gebruikt worden voor voorspellingen buiten het bereik liggen van het domein⁷ waarvoor de regressierelatie is opgezet, worden de voorspellingen gebaseerd op extrapolatie. Het criterium waarmee wordt vastgesteld of er al dan niet sprake is van extrapolatie bij het toepassen van een regressiemodel is $x_0'(X'X)^{-1}x_0 > 2p/n$ ⁸ (Oude Voshaar, 1994).

Bij voorspellingen in punten waarvoor deze vergelijking opgaat is er sprake van extrapolatie en is een gezond wantrouwen op zijn plaats. De verklarende variabelen

⁷ Het domein is het meetbereik van de parameters waarop een regressierelatie is gebaseerd.

⁸ p is het aantal regressiecoëfficiënten (inclusief de constante), n is het aantal waarnemingen waarop het model is gefit, x_0 is de vector met lengte p waarin $p-1$ verklarende variabelen van het regressiemodel en de regressieconstante zijn opgenomen en X is de $(n \times p)$ matrix met de p verklarende variabelen als kolommen en de n waarnemingen als rijen.

liggen dan buiten het experimenteergebied, zodat bij de voorspelling mogelijk een onverantwoorde extrapolatie wordt gebruikt (Oude Voshaar, 1994).

5.2.2 GxG

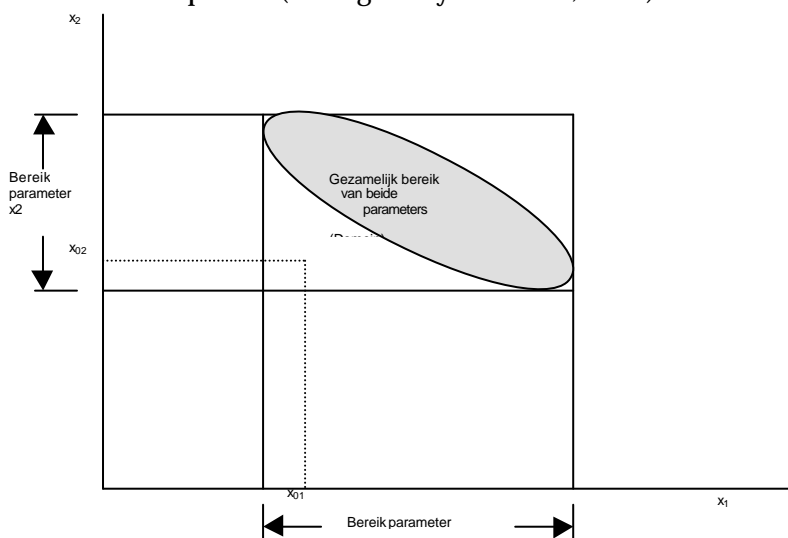
Bij de bepaling van de GxG is gebruik gemaakt van stambuisregressie. Bij de stambuisregressie wordt zoals beschreven in paragraaf 4.1 een relatie gebruikt tussen de gemeten winter en/of zomergrondwaterstand en de GxG. Bij de bepaling van de GxG kan er voor gekozen worden om gebruik te maken van een regressierelatie, op basis van één gemeten grondwaterstand, of van een modelselectie, waarbij gebruik gemaakt wordt van één of beide gemeten grondwaterstanden. In tabel 4 is bij verschillende keuzes voor de regressierelatie een overzicht gegeven van het percentage van de gerichte opnamen waarbij bij de voorspelling van de GxG niet wordt geëxtrapoleerd. In de tabel is te zien dat het aantal voorspellingen dat niet afvalt bij gebruik van het extrapolatiecriterium voor de GHG over het algemeen het grootste is indien alleen gebruik wordt gemaakt van de wintergrondwaterstand als verklarende variabele. Ook voor de GLG is het aantal extrapolaties bij het gebruik van de wintergrondwaterstand in de meeste gebieden het laagst. In de tabel is te zien dat bij het gebruik van modelselectie met één of twee gemeten standen als verklarende variabelen het aantal extrapolaties afhankelijk van het gebied tot ongeveer 10% hoger kan zijn. Theoretisch gezien mag verwacht worden dat bij gebruik van één verklarende variabele eerder aan het extrapolatiecriterium wordt voldaan. Bij het gebruik van twee verklarende variabelen moet tegelijk aan twee bereiken worden voldaan.

Tabel 4 Percentage van de gerichte opnamen waarbij niet wordt geëxtrapoleerd bij het voorspellen van de GxG.

Gebied	Aantal gerichte opnamepunten dat aan het extrapolatiecriterium voldoet (%)								
	Modelselectie			Winterstand			Zomerstand		
	GHG	GVG	GLG	GHG	GVG	GLG	GHG	GVG	GLG
Brabant-Oost	89.5	88.0	90.7	89.8	89.8	89.8	95.0	95.0	95.0
Brabant-West	79.3	77.9	80.2	80.0	80.0	80.0	78.0	78.0	78.0
De Leijen	87.7	87.7	87.2	88.7	88.7	88.7	80.3	80.3	80.3
Oost-Nederland	69.6	69.4	72.5	72.1	72.1	72.1	80.0	80.0	80.0
Peel en Maasvlei	60.5	59.0	61.2	71.2	71.2	71.2	57.8	57.8	57.8
Noord-Nederland	87.0	86.7	89.4	97.0	97.0	97.0	93.9	93.9	93.9
Midden-Nederland	87.2	79.5	84.2	89.5	89.5	89.5	87.4	87.4	87.4
Limburg	50.5	42.8	45.3	60.4	60.4	60.4	49.2	49.2	49.2
Rijn en IJssel	73.3	72.0	77.7	81.7	81.7	81.7	78.3	78.3	78.3
Reest en Wieden	42.6	44.3	58.1	51.3	51.3	51.3	58.4	58.4	58.4
Totaal	77.8	76.4	80.2	82.4	82.4	82.4	83.2	83.2	83.2

In figuur 17 is een voorbeeld weergegeven van extrapolatie bij het gebruik van multiple regressie. In de figuur is het domein weergegeven waarbinnen de originele meetdata voor een regressie met twee verklarende variabelen voorkomt. Het punt (x01, x02) ligt binnen het afzonderlijke bereik van zowel regressieparameters x1 als x2. Het punt ligt echter buiten het gecombineerde domein van de originele meetdata. Het gebruik van multiple regressie in dit geval betekent dat er eerder geëxtrapoleerd

wordt, terwijl het gebruik van afzonderlijke enkelvoudige regressiemodellen niet zal leiden tot extrapolatie (Montgomery and Peck, 1992).



Figuur 17 Een voorbeeld van extrapolatie bij het gebruik van multiple regressie (naar: Montgomery and Peck, 1992)

In tabel 5 is een overzicht gegeven van de gemiddelde standaarddeviatie van de voorspelde GxG. In de tabel is alleen de gemiddelde standaarddeviatie voor de gerichte opnamepunten, waarbij niet wordt geëxtrapoleerd weergegeven. Voor de GHG en de GVG is te zien dat gebruik van de winter- en/of de zomermeting in de meeste gebieden een kleinere gemiddelde standaarddeviatie geeft dan het gebruik van alleen de wintermeting. Voor de GHG is het verschil in de gemiddelde standaarddeviatie bij gebruik van alleen de wintermeting of het gebruik van beide metingen als verklarende variabelen gering (gemiddeld ongeveer 1 cm). Doordat geen gebruik is gemaakt van de gerichte opnamepunten waarbij wordt geëxtrapoleerd is het aantal gerichte opnamepunten waarover de gemiddelde onzekerheid berekend is bij het gebruik van de winterstand groter dan bij de modelselectie. Voor de GLG is duidelijk te zien dat het gebruik van een enkelvoudige regressie op basis van de zomergrondwaterstand voor de meeste gebieden betere resultaten levert. De gemiddelde standaarddeviatie is ongeveer 5 cm groter bij het gebruik van modelselectie op basis van de zomer- en/of winterstand als verklarende variabele, ten opzichte van het gebruik van alleen de zomerstand.

Tabel 5 Gemiddelde standaarddeviatie van de voorspelde GxG zonder gebruik te maken van punten waarbij wordt geëxtrapoleerd.

Gebied	Gemiddelde standaarddeviatie zonder extrapolatiepunten								
	Modelselectie			Winterstand			Zomerstand		
	GHG	GVG	GLG	GHG	GVG	GLG	GHG	GVG	GLG
Brabant-Oost	15.6	13.4	24.6	16.5	14.9	34.8	22.6	20.7	16.3
Brabant-West	20.5	18.4	24.0	20.8	19.5	33.7	28.3	24.3	17.0
De Leijen	20.6	20.9	22.8	19.6	20.5	30.2	24.9	23.4	20.7
Oost-Nederland	17.7	16.5	24.7	19.7	20.1	35.6	23.1	18.9	18.3
Peel en Maasvlei	21.1	18.6	22.2	20.0	20.0	39.7	29.4	25.8	16.8
Noord-Nederland	15.5	15.4	22.5	17.5	19.0	32.6	24.9	21.7	20.2
Midden-Nederland	11.2	11.6	17.7	11.8	14.1	27.7	23.2	18.9	17.5
Limburg	16.3	14.1	16.5	19.2	19.8	40.1	27.3	24.2	16.6
Rijn en IJssel	16.6	14.0	15.5	16.7	14.4	19.3	20.8	16.5	15.9
Reest en Wieden	15.7	14.0	19.3	18.4	20.5	30.9	18.8	14.9	18.2
Totaal	16.4	15.1	22.4	17.5	17.5	32.4	23.8	20.5	17.8

Indien gekeken wordt naar de totale dataset en er geen rekening wordt gehouden met extrapolatie levert dit grofweg hetzelfde beeld (tabel 6). Zoals verwacht mag worden is de gemiddelde standaarddeviatie indien geen rekening gehouden wordt met extrapolatie in alle gevallen groter (vergelijking tabel 5 en 6). Bij extrapolatie worden voorspellingen gedaan voor het uiterste bereik van de regressierelatie. Voor deze uitersten is de voorspelnauwkeurigheid relatief gering, waardoor ook de gemiddelde standaarddeviatie hoger wordt.

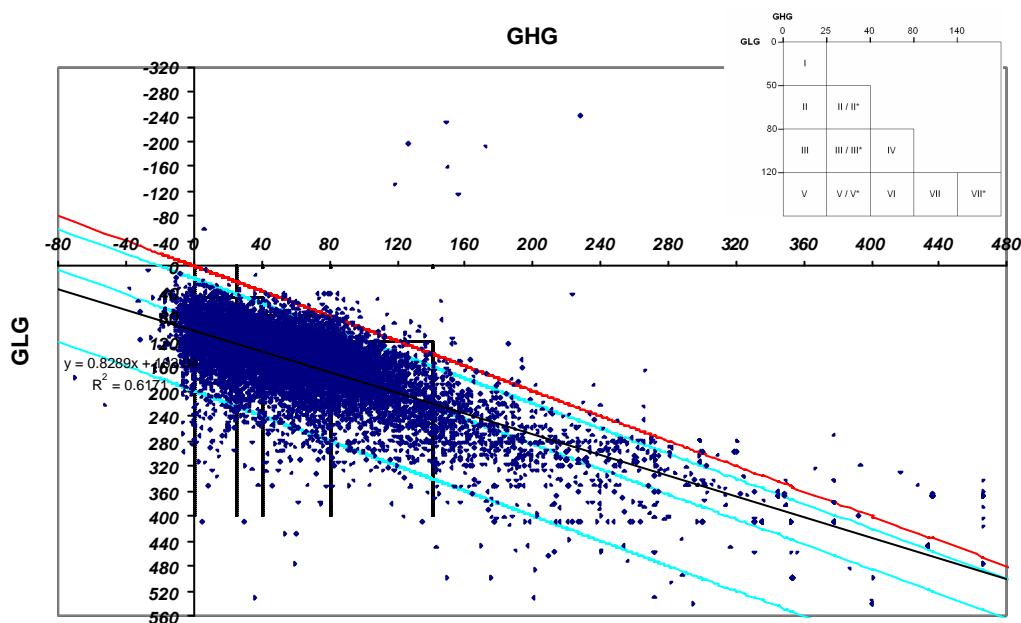
Tabel 6 Gemiddelde standaarddeviatie van de voorspelde GxG voor alle meetpunten.

Gebied	Gemiddelde standaarddeviatie met extrapolatiepunten								
	Modelselectie			Winterstand			Zomerstand		
	GHG	GVG	GLG	GHG	GVG	GLG	GHG	GVG	GLG
Brabant-Oost	16.0	14.0	25.3	17.2	15.7	35.7	22.6	20.7	16.5
Brabant-West	21.0	19.0	24.6	21.2	20.0	34.6	29.0	24.9	17.3
De Leijen	20.7	21.1	22.9	19.8	20.6	30.3	25.5	23.9	20.8
Oost-Nederland	18.8	17.4	25.9	20.6	21.0	36.7	23.6	19.1	18.4
Peel en Maasvlei	22.0	19.4	22.9	21.1	21.0	41.5	30.3	26.7	17.3
Noord-Nederland	15.9	15.6	22.5	17.6	19.0	32.7	25.0	21.8	20.3
Midden-Nederland	11.4	11.8	18.0	12.0	14.3	28.1	23.4	19.1	17.7
Limburg	20.3	18.8	20.7	21.4	21.6	43.2	27.5	24.4	17.2
Rijn en IJssel	18.1	14.9	16.1	17.3	15.1	20.0	22.0	17.1	16.7
Reest en Wieden	16.7	15.5	20.4	18.7	21.3	33.7	20.4	15.8	18.8
Totaal	17.2	15.8	22.9	18.2	18.3	33.5	24.2	20.7	18.0

Om inzicht te krijgen in de berekende GxG waarden zijn de GHG en de GLG tegen elkaar uitgezet (figuur 18). In de figuur zijn alle datapunten van de gerichte opname uitgezet, en is geen rekening gehouden met eventuele extrapolatie. Bij het uitzetten van de GHG tegen de GLG mag op basis van de definitie van de Gt verwacht worden dat de resultaten in een bepaald traject van de figuur voorkomen. Rechts boven in de figuur is een overzicht weergegeven van de Gt-indeling. De GHG berekend over de hydrologische jaren moet altijd hoger zijn dan de GLG. Hierdoor mogen de punten alleen onder de 1 op 1 lijn voorkomen (rode lijn in de figuur). De fluctuaties tussen de GHG en de GLG is over het algemeen beperkt. Alleen in een

situatie met een slecht doorlatende leemlaag kan als gevolg van een schijngrondwaterspiegel in natte perioden, het verschil tussen GHG en GLG zeer groot zijn. In de figuur is te zien dat er een aantal extreme waarden voorkomen. De extreme waarden met een negatieve GLG blijken allemaal te maken te hebben met extrapolaties. De berekende standaarddeviatie van dergelijke punten is iets hoger, maar staat niet in verhouding met de extreme afwijking. Mede op basis van deze uitkomsten is er voor gekozen om het eerdergenoemde extrapolatiecriterium stringent te hanteren.

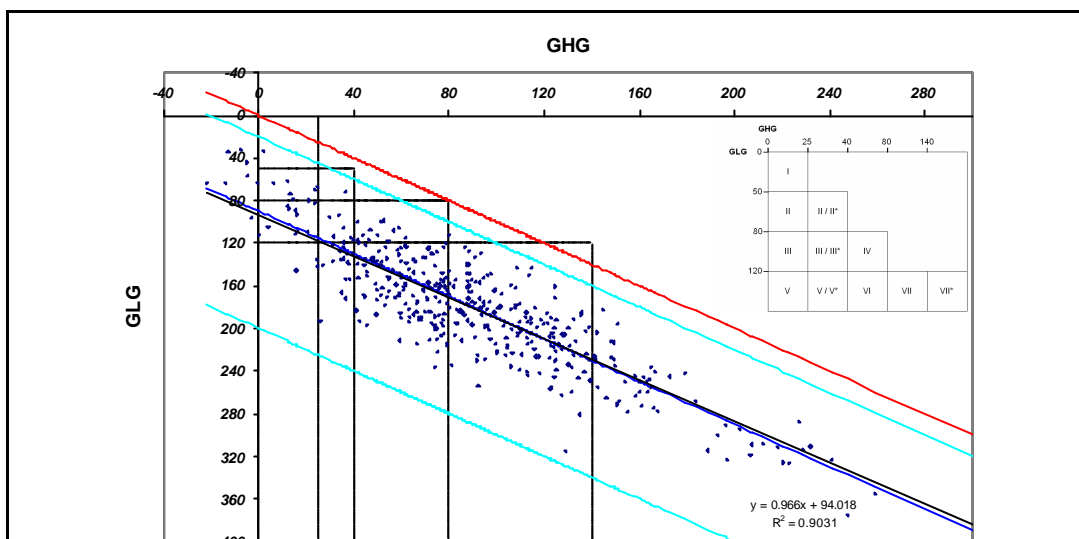
Om inzicht te krijgen in de te verwachten fluctuatie tussen de GHG en de GLG zijn de berekende waarden voor de buisgegevens tegen elkaar uitgezet (figuur 19). In figuur 19 zijn de resultaten van de afzonderlijke gegevensbronnen weergegeven. De horizontale en verticale lijnen in de figuur komen overeen met de grenzen tussen de Gt-classes.



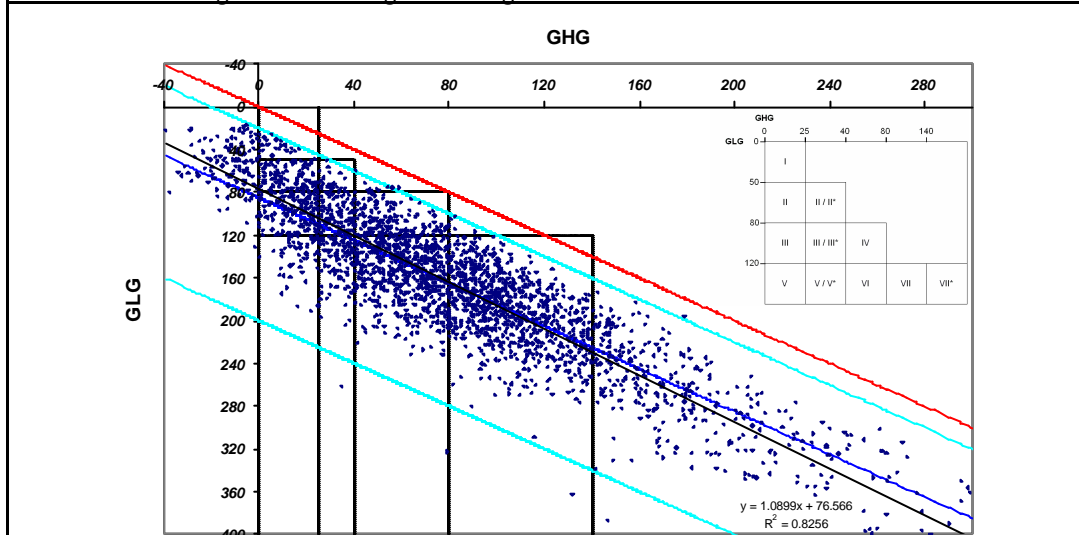
Figuur 18 Relatie tussen de GHG en de GLG voor de gerichte opnamepunten.

Bij de stambuizen is te zien dat vooral Gt I en Gt V ondervertegenwoordigd zijn in de stambuizen-set. Daarnaast is bij de stambuizen te zien dat de fluctuatie tussen de GHG en de GLG beperkt is en maximaal ongeveer 130 cm bedraagt. Het minimale verschil tussen GHG en GLG is ongeveer 30 cm. De GHG en de GLG voor de stambuizen blijken onderling sterk gecorreleerd te zijn. In de figuur is de relatie weergegeven. De helling van de lijn loopt bijna parallel aan de 1:1 lijn en snijdt de y-as op 94 cm, wat betekent dat het gemiddelde verschil tussen GHG en GLG 94 cm bedraagt. Voor de overige buizen is eveneens een hoge correlatie tussen de GHG en de GLG te zien. De regressielijn loopt eveneens bijna parallel aan de 1 op 1 lijn en snijdt de y-as op 77 cm. Aangezien voor beide datasets de richtingscoëfficiënt ongeveer 1 bedraagt kan op basis van de intercept geconcludeerd worden dat de stambuizen-set gemiddeld droger is dan de dataset met overige buizen. Hierbij moet

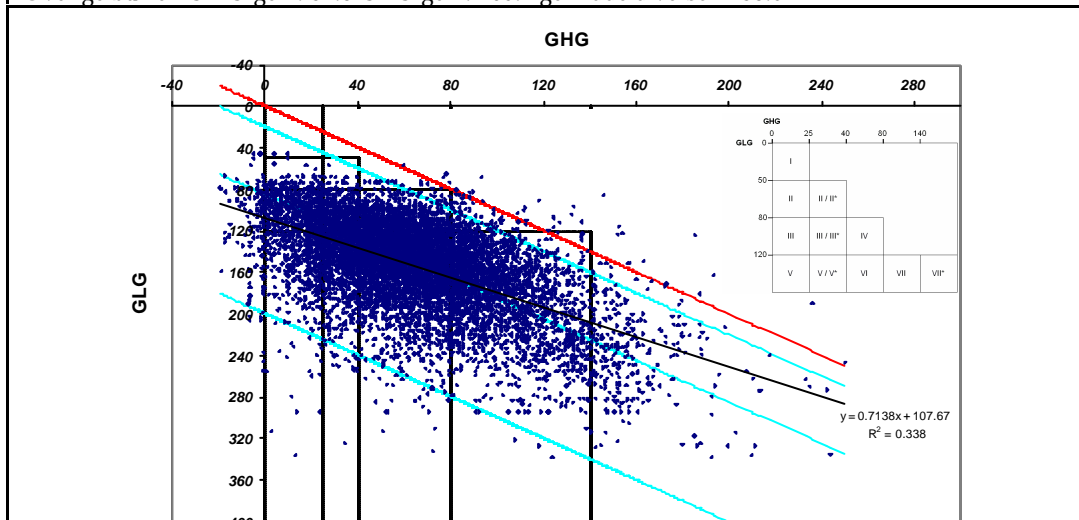
worden opgemerkt dat de dataset met overige buizen landsdekkend is en de stambuizenset alleen het pleistocene zandgebied van Nederland betreft. De spreiding van de overige buizen over de Gt-klassen lijkt evenwichtig verdeeld en geen Gt-klassen lijken ondervertegenwoordigd te zijn. De fluctuatie tussen de GHG en GLG is voor deze buizenset iets groter. De fluctuatie bedraagt minimaal 20 cm en maximaal ongeveer 180 cm. De laatste figuur heeft betrekking op de gerichte opnamen. De extreme uitschieters komen doordat het extrapolatiecriterium is gehanteerd veel minder voor. Toch zijn er nog een aantal locaties waarbij de GHG lager is dan de GLG en een aantal locaties met zeer grote fluctuaties. Op basis van de buisgegevens is een traject gedefinieerd waarbinnen de datapunten zich moeten bevinden. De minimale fluctuatie tussen GHG en GLG is op 20 cm gesteld en de maximale op 180 cm. De gerichte opname locaties waarvoor de gegevens niet voldoen aan dit criterium zijn niet meegenomen in de verdere verwerking van de dataset.



Stambuizen GHG gem. 99.6 GLG gem. 191.2 gemiddeld verschil 90.6



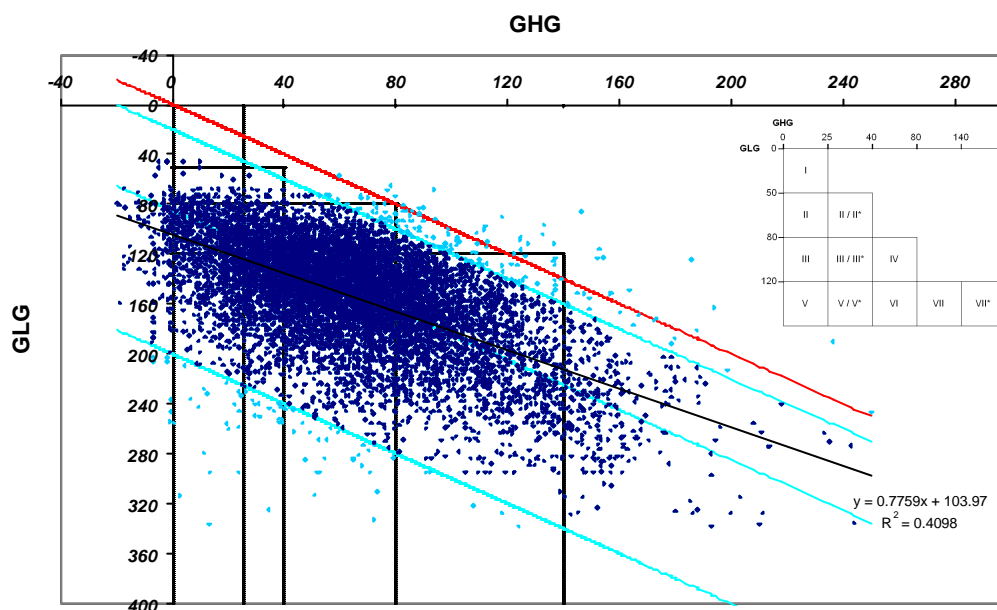
Overige buizen GHG gem. 81.3 GLG gem. 165.2 gemiddeld verschil 83.9



Gerichte opnamen GHG gem. 64.1 GLG gem. 153.4 gemiddeld verschil 89.3

Figuur 19 Relatie tussen de GHG en de GLG voor de afzonderlijke gegevensbestanden

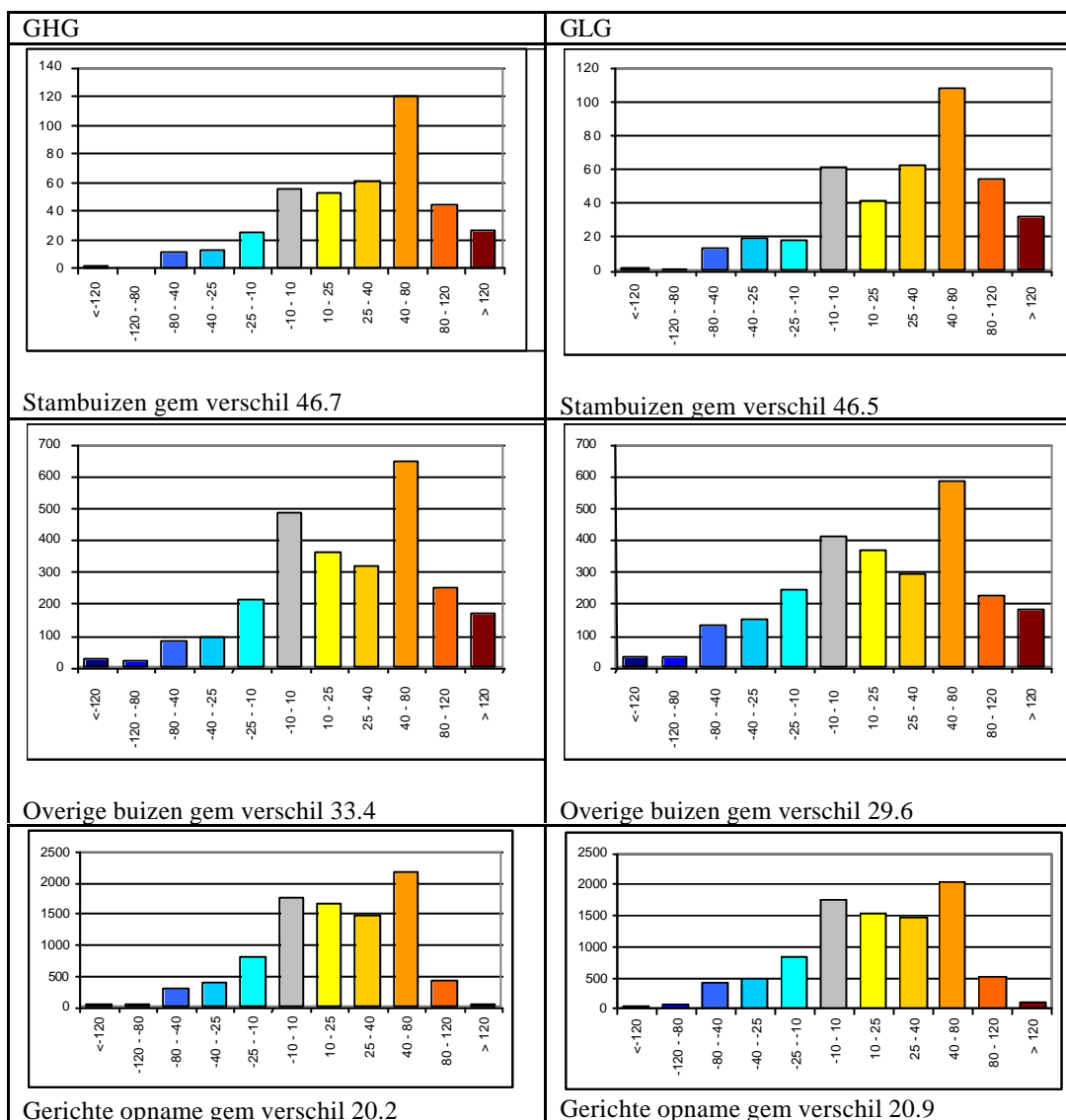
In figuur 20 is het onderscheid tussen de locaties die wel en niet voldoen aan het selectie criterium weergegeven. Deze manier van selecteren heeft ook tot gevolg dat locaties waarvoor alleen maar de GHG of de GLG kon worden bepaald ook buiten beschouwing zijn gelaten bij de verdere analyse. Selectie van deze gegevens is door het ontbreken van één van beide waarden immers niet mogelijk. In de figuur is te zien dat Gt I en II een zeer gering aandeel hebben in de totale dataset met gerichte opnamen. Het geringe aandeel van de natte Gt's wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de afvlakkende werking van de stambuisregressie (paragraaf 4.2). Deze afvlakking komt ook tot uiting in de regressielijn in figuur 20. De regressielijn voor de gerichte opnames verloopt veel vlakker dan de 1 op 1 lijn.



Figuur 20 Relatie tussen de GHG en de GLG voor de uiteindelijk geselecteerde gerichte opname punten.

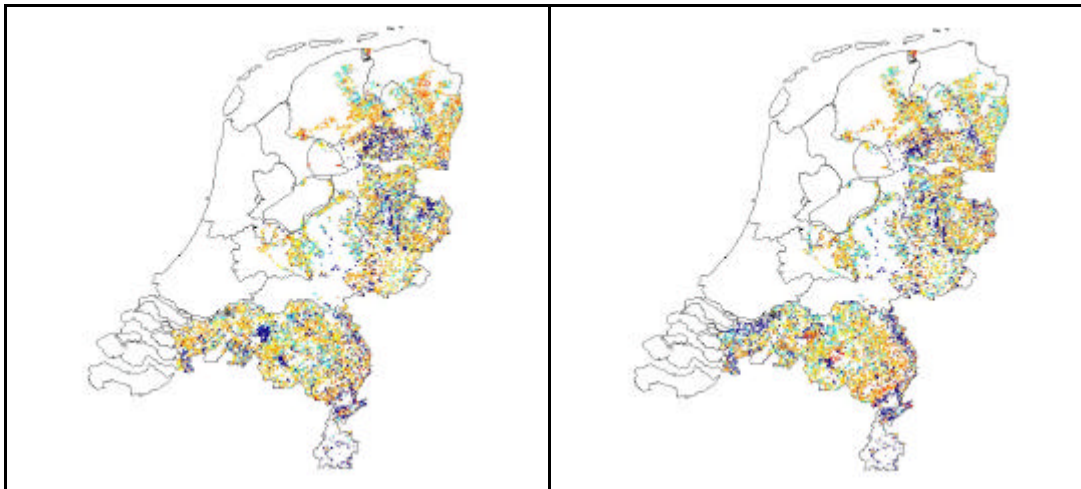
Om de berekende GxG te kunnen controleren zijn de gegevens vergeleken met de gegevens uit de bodemkaart (1:50 000). De Gt informatie in de bodemkaart is door middel van een vertaaltabel omgezet naar GxG (aanhangel 8). Aan iedere locatie van de gebruikte grondwaterstandsbuizen en de gerichte opnames is vervolgens een GxG uit de bodemkaart gekoppeld. Door de toekenning van deze gegevens is het mogelijk om het verschil in GHG en GLG te bepalen tussen de bodemkaart en de in het kader van dit project berekende GxG. In figuur 21 zijn de verschillen tussen de bodemkaart en de berekende GHG en GLG voor de verschillende databestanden weergegeven. De histogrammen met de verdeling van het verschil tussen de bodemkaart en de berekende GHG en GLG voor de drie databestanden geven een identieke verdeling te zien. De stambuizen en de gerichte opnamepunten hebben betrekking op het Pleistoceen deel van Nederland. De overige buislocaties hebben betrekking op heel Nederland. Voor alle histogrammen geldt dat het een vergelijking op puntniveau betreft, welke niet direct representatief zijn voor een bepaald oppervlak. Voor de stambuizen is een gemiddeld verschil gevonden van een ongeveer 45 cm drogere situatie voor zowel de GHG als de GLG. Voor de gerichte opnames is het gemiddelde verschil in de orde van 20 cm droger, terwijl deze

puntlocaties betrekking hebben op hetzelfde gebied en de gegevens voor de gerichte opnamelocaties zijn afgeleid van de stambuizen door middel van stambuisregressie. Mogelijke verklaringen voor het verschil zijn wellicht de representativiteit van de buislocaties, de afvlakkende werking van de stambuisregressie en de begrenzing van de voorspellingen. Buislocaties zijn niet altijd representatief voor een kaartvlak. Vaak liggen buizen nabij boeren erven of in wegbermen die vaak iets hoger liggen. Het verschil tussen de bodemkaart en de buisgegevens kan hierdoor worden overschat.



Figuur 21 Verskil tussen de GHG en GLG op basis van de bodemkaart en de in het kader van dit project berekende GHG en GLG voor de afzonderlijke databestanden.

In figuur 22 is een ruimtelijk beeld weergegeven van de verschillen tussen de GHG en GLG op de bodemkaart en de berekende GHG en GLG in het kader van dit project. In de figuur zijn allen de gerichte opnamelocaties weergegeven. De locaties waar nu een nattere situatie dan in de kaart is berekend vallen op door concentraties van donkerblauwe punten. Vooral in Drenthe en enkele plaatsen in Noord-Brabant zijn natter.



Figuur 22 Ruimtelijk beeld van het verschil tussen de Bodemkaart en de gerichte opnamepunten. (GHG (links) en GLG (rechts))

5.2.3 xG3

Bij de bepaling van de xG3 is evenals bij de GxG gebruik gemaakt van stambuisregressie. Bij de stambuisregressie wordt zoals beschreven in paragraaf 4.1 een relatie gebruikt tussen de gemeten winter en/of zomergrondwaterstand en de xG3 voor 1995. Bij de bepaling van de xG3 kan er eveneens voor gekozen worden om gebruik te maken van een regressierelatie, op basis van één gemeten grondwaterstand, of van een modelselectie, waarbij gebruik gemaakt wordt van één of beide gemeten grondwaterstanden. In tabel 7 is een overzicht gegeven van het percentage van de gerichte opnamen waarbij bij de voorspelling van de xG3 niet wordt geëxtrapoleerd. In de tabel is te zien dat het aantal voorspellingen dat niet afvalt bij gebruik van het extrapolatiecriterium voor de HG3 over het algemeen het grootste is indien alleen gebruik wordt gemaakt van de wintergrondwaterstand als verklarende variabele.

Tabel 7 Percentage van de gerichte opnamen waarbij niet wordt geëxtrapoleerd bij het voorspellen van de xG3.

Gebied	Aantal gerichte opnamepunten dat aan het extrapolatiecriterium voldoet (%)								
	Modelselectie			Winterstand			Zomerstand		
	HG3	VG3	LG3	HG3	VG3	LG3	HG3	VG3	LG3
Brabant-Oost	90.5	90.1	90.3	89.8	89.8	89.8	95.0	95.0	95.0
Brabant-West	79.0	78.1	79.4	80.0	80.0	80.0	78.0	78.0	78.0
De Leijen	87.7	87.7	87.2	88.7	88.7	88.7	80.3	80.3	80.3
Oost-Nederland	81.8	75.0	87.7	87.5	91.1	95.7	73.2	81.0	93.4
Peel en Maasvlei	71.3	67.0	61.2	71.2	71.2	71.2	57.8	57.8	57.8
Noord-Nederland	95.8	95.3	90.4	97.0	97.0	97.0	93.9	93.9	93.9
Midden-Nederland	89.4	89.4	86.7	89.5	89.5	89.5	87.4	87.4	87.4
Limburg	58.8	58.8	46.0	60.4	60.4	60.4	49.2	49.2	49.2
Rijn en en IJssel	77.5	77.5	77.0	81.7	81.7	81.7	78.3	78.3	78.3
Reest en Wieden	50.9	45.7	58.1	51.3	51.3	51.3	58.4	58.4	58.4

Totaal	83.3	81.4	82.8	84.8	85.4	86.1	82.1	83.4	85.4
--------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

In tabel 8 is een overzicht gegeven van de gemiddelde standaarddeviatie van de voorspelde xG3. In de tabel is alleen de gemiddelde standaarddeviatie voor de gerichte opnamepunten, waarbij niet wordt geëxtrapoleerd weergegeven. Voor de HG3 is te zien dat gebruik van de wintermeting en modelselectie weinig verschillen. Voor de LG3 geldt wel dat het gebruik van een enkelvoudige regressie op basis van de zomergrondwaterstand over het algemeen betere resultaten levert.

Tabel 8 Gemiddelde standaarddeviatie van de voorspelde xG3 zonder gebruik te maken van punten waarbij wordt geëxtrapoleerd.

Gebied	Gemiddelde standaarddeviatie zonder extrapolatiepunten								
	Modelselectie			Winterstand			Zomerstand		
	HG3	VG3	LG3	HG3	VG3	LG3	HG3	VG3	LG3
Brabant-Oost	13.6	10.9	27.5	13.7	11.2	40.4	24.9	24.2	16.6
Brabant-West	17.1	16.5	32.7	16.6	16.0	43.0	30.2	31.4	25.1
De Leijen	26.6	29.6	26.3	26.5	29.7	35.7	28.5	30.7	23.6
Oost-Nederland	25.0	23.8	24.7	25.0	24.7	43.3	40.0	35.5	25.2
Peel en Maasvlei	23.9	24.1	27.3	21.8	22.4	47.7	35.1	33.7	21.7
Noord-Nederland	24.1	25.9	23.6	24.0	26.2	31.6	32.3	31.8	21.4
Midden-Nederland	17.2	15.3	19.2	17.2	15.3	31.4	24.2	21.2	18.5
Limburg	22.6	23.4	22.8	22.7	23.4	47.7	35.7	34.7	24.0
Rijn en en IJssel	31.1	27.2	22.9	31.3	27.6	28.5	32.0	28.4	23.1
Reest en Wieden	18.4	18.7	18.4	19.6	21.5	30.4	22.5	20.3	17.2
Totaal	20.5	19.6	25.2	20.5	20.0	37.4	30.0	28.7	21.0

Indien gekeken wordt naar de totale dataset en er geen rekening wordt gehouden met extrapolatie is het gebruik van enkelvoudige regressie gunstiger (tabel 9). De gemiddelde standaarddeviatie is bij het gebruik van enkelvoudige regressie over het algemeen lager dan de modelselectie. Er mag echter verwacht worden dat door het gebruik van extra verklarende variabelen meer variantie wordt verklaard, waardoor de standaarddeviatie afneemt. Na nadere analyse van de data blijkt echter dat de hogere gemiddelde standaardafwijking wordt veroorzaakt door het ontbreken van meetgegevens. Indien voor een gerichte opnamepunt de wintergrondwaterstand onbekend is, kan bij het gebruik van enkelvoudige regressie geen voorspelling worden gedaan van de HG3. Indien gebruik wordt gemaakt van de keuzemogelijkheid tussen enkelvoudige en multiple regressie bestaat er maar één keuzemogelijkheid, namelijk het gebruik van de zomergrondwaterstand voor de voorspelling van de HG3. Door de over het algemeen slechte relatie tussen de zomerstand en de HG3 neemt de gemiddelde standaarddeviatie toe naarmate er meer meetgegevens ontbreken.

Uit vergelijking van de klimaatrepresentatieve GxG en de xG3-95 blijkt dat het jaar 1995 vooral wordt gekenmerkt door een veel nattere situatie voor de gemiddeld hoogste grondwaterstand, terwijl de gemiddeld laagste grondwaterstand ongeveer overeenkomt met het langjarig gemiddelde. Vooral de winter 1994-1995 is zeer nat geweest waardoor de HG3-95 zeer hoog is. Indien bij het vergelijken van de GxG en de xG3-95 gekeken wordt naar de verschillende gegevensbronnen mag verwacht worden dat de verschillen hetzelfde beeld geven. Voor de stambuizen en de overige buizen is het beeld nagenoeg identiek. Voor de gerichte opnamepunten was het beeld

in eerste instantie niet overeenkomstig met de buisgegevens. Het toepassen van de selectiecriteria zoals beschreven in paragraaf 5.2.2. heeft ertoe geleid dat het beeld enigszins overeenkomt met de buisgegevens.

Tabel 9 Gemiddelde standaarddeviatie van de voorspelde GxG voor alle meetpunten.

Gebied	Gemiddelde standaarddeviatie met extrapolatiepunten								
	Modelselectie			Winterstand			Zomerstand		
	HG3	VG3	LG3	HG3	VG3	LG3	HG3	VG3	LG3
Brabant-Oost	14.1	11.7	28.1	14.2	12.1	41.6	24.9	24.2	16.8
Brabant-West	17.6	17.2	33.5	17.0	16.5	44.2	30.9	32.1	25.6
De Leijen	26.7	29.7	26.4	26.6	29.9	35.8	29.0	31.2	23.8
Oost-Nederland	25.3	23.8	24.7	25.3	24.9	43.1	40.1	35.7	25.2
Peel en Maasvlei	24.5	25.3	28.3	22.5	23.2	50.0	36.7	35.0	22.5
Noord-Nederland	24.2	26.0	23.8	24.1	26.3	31.6	32.4	31.8	21.5
Midden-Nederland	17.4	15.4	19.5	17.4	15.4	31.8	24.4	21.4	18.7
Limburg	25.8	26.7	31.5	24.4	25.1	52.4	36.9	35.7	25.3
Rijn en en IJssel	32.5	28.2	23.8	32.4	28.6	29.5	33.2	29.2	24.7
Reest en Wieden	18.5	19.4	19.8	19.3	21.7	33.2	24.5	21.9	17.9
Totaal	21.0	20.2	25.8	20.9	20.5	38.3	30.8	29.1	21.4

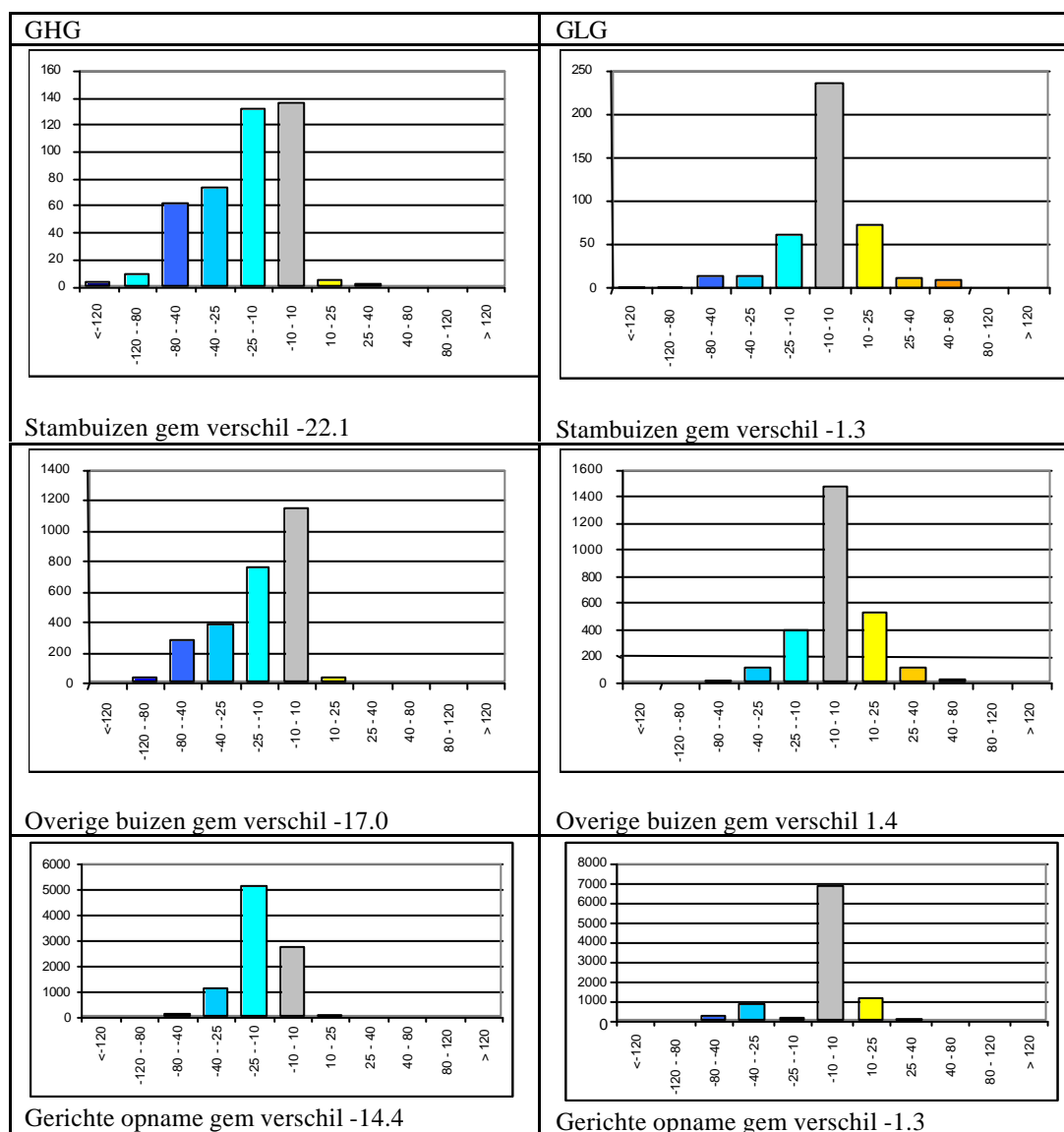


Fig. 23. Verschil tussen de GHG en GLG en de HG3-95 en LG3-95 voor de afzonderlijke databestanden.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Tijdreeksmodellering

Conclusies

Het blijkt van groot belang om de grondwaterstandsgegevens die worden opgevraagd te controleren op eventuele meet- of tikfouten. Dergelijke meetfouten in de databestanden kunnen tot gevolg hebben dat de berekende grondwaterkarakteristiek op basis van tijdreeksanalyse sterk kan worden beïnvloed. Het effect van dergelijke meetfouten op het kalibratieresultaat van de tijdreeksanalyse blijkt sterk te verschillen en is op voorhand niet te voorspellen. Het gevonden effect van dergelijke meetfouten op de berekende GxG kan variëren van nog geen centimeter tot ongeveer 90 centimeter. Uit de praktijk blijkt dat het effect van de meetfouten vooral groot is indien de meetfout tegengesteld is aan de impuls, het neerslagoverschot. Een tijdreeks is immers een impuls-respons relatie. Indien de respons (= de grondwaterstand) als gevolg van een meetfout omhoog gaat, terwijl er geen neerslag is gevallen, kan één meting in een periode van ongeveer 10 jaar grote effecten hebben op de berekende GxG. Vooral meetfouten naar boven hebben over het algemeen grote effecten op de uitkomsten. Deze meetfouten zijn echter vaak moeilijk visueel te herkennen.

Indien gebruik wordt gemaakt van verschillende 8-jaarse periodes binnen één klimaatsperiode, blijkt de Gt te fluctueren. De voortschrijdende Gt berekend over een periode van 8 jaar op basis van de meetgegevens blijkt een fluctuatie te hebben die ongeveer overeenkomt met de fluctuatie in het neerslagoverschot, indien voor het neerslagoverschot eveneens gekeken wordt naar het voortschrijdend gemiddelde over 8 jaar. Indien gebruik wordt gemaakt van tijdreeksanalyse om de Gt klimaatrepresentatief te maken blijken de tijdreeksresultaten te verschillen, afhankelijk van de gekozen 8-jaarse kalibratieperiode. Het effect van de gekozen kalibratieperiode werkt door in de simulatieperiode van 30 jaar. Hierdoor kan de berekende GxG verschillen als gevolg van verschillen in kalibratieperiodes. Een mogelijke verklaring voor het effect is het gebruik van lineaire tijdreeksmodellen, die voornamelijk gefit worden op 'het zwaartepunt' in de kalibratiedata. Dit heeft vermoedelijk tot gevolg dat de gekalibreerde tijdreeksparameters het beste passen bij het gemiddelde van de kalibratiedata. Indien de processen die de grondwaterstand beïnvloeden niet-lineair zijn, kan kalibratie op relatief natte of droge jaren verschillende uitkomsten geven bij langjarige simulaties. Deze veronderstelling kan worden onderbouwd indien gekeken wordt naar de fysische parameters drainageweerstand en bergingscoëfficiënt. Fysische interpretatie van de gekalibreerde tijdreeksparameters laten eveneens een fluctuatie zien in de bergingscoëfficiënt en de drainageweerstand, waarbij de parameters deels uitwisselbaar zijn. Uit de analyse blijkt dat een klimaatrepresentatieve Gt moeilijk is te voorspellen met lineaire tijdreeksmodellen.

Daarnaast lijkt de gegeven onzekerheid in de Gt op basis van de tijdreeksanalyse onderschat. De berekende standaarddeviatie is in de meeste gevallen 1 tot enkele centimeters (Finke, et al., 2002; Hoogland et al., 2003). Bij het bepalen van deze onzekerheid is er van uitgegaan dat het tijdreeksmodel bekend is. De voortschrijdende tijdreeksanalyse geeft echter aan dat er ook onzekerheid is over de parameters van het gekalibreerde model. Het niet meenemen van de onzekerheid in deze parameters van het tijdreeksmodel geeft een onderschatting van de onzekerheid.

Om inzicht te krijgen in het effect van ruimtelijke meteorologische verschillen op de berekende GxG is gekeken naar het effect van meteogegevens, afkomstig van verschillende meteostations in een straal van 20 km rondom een meetpunt. Voor alle meteostations binnen een straal van 20 kilometer zijn tijdreeksen gekalibreerd op eenzelfde periode van 8 jaar. De verschillen in de GxG tussen de verschillende tijdreeksen bedragen enkele centimeters. De verschillen zijn groot in vergelijking met de opgegeven onzekerheid voor de tijdreeks GxG, maar klein in verzeleken met het gebruik van andere kalibratieperioden. Kennelijk hebben temporele verschillen meer effect op de berekende GxG dan ruimtelijke verschillen. De fluctuatie in droge en natte jaren komt immers over grotere gebieden voor. Zeer locale neerslagpieken die veelal in de zomer voorkomen hebben wellicht maar een geringe impact op de langjarige Gt.

Aanbevelingen

Voor het klimaatrepresentatief bepalen van de Gt op basis van meetreeksen met een beperkte meetperiode is het raadzaam om gebruik te maken van modellen die rekening houden met de niet-lineaire processen die de fluctuatie van de grondwaterstand bepalen. Het gebruik van een deterministisch model zoals SWAP of een tijdreeksmodel met stapfunctie zoals TARSO (Knotters, 2001) geven wellicht betere resultaten. Een meer deterministische beschrijving van de berging en het afvoerproces, in de vorm van een drainageweerstand die afhankelijk is van de grondwaterstand, kan tijdreeksmodellering wellicht minder afhankelijk maken van de kalibratieperioden. In het kader van een studie naar grondwatergestuurd peilbeheer zijn dergelijke aanpassingen doorgevoerd (van der Gaast en Massop, in prep)

Voor het kwantificeren van de onzekerheid in de berekende grondwaterkarakteristieken is nader onderzoek noodzakelijk. Vooral het meenemen van de onzekerheid in de gekalibreerde tijdreeksparameters en het kwantificeren van deze onzekerheid vraagt om nader onderzoek.

Het effect van ruimtelijke verschillen in het neerslagoverschot lijkt veel kleiner dan de temporele verschillen. Een breder onderzoek zou uit kunnen wijzen of de neerslagpatronen ruimtelijk vergelijkbaar zijn, waardoor de berekende GxG ruimtelijk niet sterk van elkaar verschillen.

6.2 Stambuisregressie

Conclusies

Bij stambuisregressie wordt er van uitgegaan dat er gebruik wordt gemaakt van een stambuizenet die de belangrijkste variatie in hydrologische omstandigheden (geohydrologie en ontwateringsituatie) representeert. Dit wil zeggen dat er gebruik wordt gemaakt van een stambuizenet die alle Gt's omvat. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat eenzelfde Gt door verschillende omstandigheden kan ontstaan. De gebruikte buizen binnen de stambuizenet zijn bepalend voor de resultaten van de stambuisregressie. Indien niet alle omstandigheden die in een gebied voor kunnen komen zijn vertegenwoordigd in de stambuizenet kan dit de resultaten beïnvloeden. Uitzonderingssituaties in de geohydrologie of de ontwateringssituatie kunnen de onzekerheid bij de stambuisregressie sterk beïnvloeden. In dergelijke uitzonderingssituaties kan de grondwaterstand anders reageren op de neerslag, waardoor het meetpunt kan lijken op een uitbijter in de relatie.

Een duidelijk voorbeeld is het wel of niet voorkomen van buisdrainage. Bij een relatief hoge neerslag zal de grondwaterstand stijgen met een snelheid die afhankelijk is van de uitgangssituatie en de berging. Indien de uitgangssituatie nagenoeg gelijk is (De uitgangssituatie is in de meeste gevallen met drainage droger dan in de situatie zonder drainage) kan de grondwaterstand in beide gevallen ongeveer evenveel stijgen. In een situatie met drainage zal de grondwaterstand vervolgens sneller dalen. De drainageweerstand is immers geringer. De piek in de grondwaterstand is hierdoor kortstondiger dan in de situatie zonder drainage. Dit komt tot uiting indien gekeken wordt naar de overschrijdingsfrequentie van de GHG, of indien de duurlijnen van de grondwaterstand vergeleken worden in een situatie met of zonder buisdrainage. Dit zou betekenen dat een GHG meting tijdens of net na een forse regenbui op een andere manier uitwerkt op de voorspelde GHG. Indien in de stambuizenet te weinig buizen zitten met drainage kan de GHG bij de stambuis regressie wellicht te hoog uitvallen voor locaties met buisdrainage.

Bij de stambuisregressie wordt een winter- of zomermeting gecorrigeerd voor te natte of te droge omstandigheden ten opzichte van de GHG of de GLG. Als gevolg van verschillende situaties, bijvoorbeeld een wegzijgings- of kwelsituatie, kan er een faseverschil zitten in het moment dat de grondwaterstand het hoogste is. Daarnaast kan er o.a. door verschillen in de drainageweerstand, een verschil zitten in de overschrijdingsfrequentie van de GHG en de GLG. Het verschil in overschrijdingsfrequentie van de GHG is mogelijk een verklaring voor het afvlakken van de voorspelde GxG. Natte Gt's hebben meestal minder bergingsmogelijkheden waardoor de grondwaterstandsfluctuatie veelal piekerig is. Dit heeft tot gevolg dat de duurlijn in het natte traject vaak relatief stijl verloopt, waardoor de overschrijdingsfrequentie van de GHG relatief gering is. Bij een droge Gt kan er veel meer geborgen worden, de grondwaterstand reageert geleidelijk en in het natte traject is de duurlijn relatief vlak. Dit heeft tot gevolg dat de overschrijdingsfrequentie van de GHG relatief groot is. Het verschil in overschrijdingsfrequentie heeft tot gevolg

dat er verschillen zijn in de kans dat een meetdag te nat of te droog is ten opzichte van de GHG.

De meetdatum blijkt van grote invloed op de regressierelatie. Metingen die dicht rond het respectievelijk GHG en GLG moment liggen hebben een sterkere relatie met de GxG dan metingen die sterk afwijken van de relatief natte en droge situatie. Vooral bij de voorspelling van de GHG en de HG3-95 vindt er een afvlakking plaats. Natte GHG's worden droger en droge GHG's worden natter voorspeld. Voor de GLG en de LG3 is deze afvlakking minimaal. Een mogelijke verklaring voor deze afvlakking is wellicht de verdeling van de GHG, welke aan de bovenkant nabij maaiveld is begrensd en derhalve niet normaal verdeeld hoeft te zijn. Een tweede mogelijke verklaring is het feit dat de grondwaterstand bij meer extremere situaties zeer verschillend kan gaan reageren op een neerslagimpuls. In nattere situaties kan er per locatie meer verschil in bijvoorbeeld de berging gaan ontstaan. Op de ene locatie kan nog berging beschikbaar zijn, terwijl op een andere locatie de berging bijna geheel benut kan zijn. In dergelijke gevallen is het de vraag of alle punten wel aan dezelfde relatie voldoen, welke bepaald wordt door de doorsnede van de stambuizenst.

Aanbevelingen

De berekende onzekerheid bij het gebruik van stambuisregressie wordt wellicht onderschat omdat de onzekerheid wordt bepaald gegeven de stambuizenst en gegeven de meetdatum. Nader onderzoek is noodzakelijk om te bepalen of de onzekerheid als gevolg van verschillende meetdata groter is dan de berekende onzekerheid van de regressielijn. In dit onderzoek is alleen gekeken naar het effect van verschillende meetdata terwijl ook de stambuizenst van belang is voor de bepaling van de GxG en haar onzekerheid. Nader onderzoek is noodzakelijk op het gebied van de representativiteit van stambuizenst voor een gebied. Hierbij kan gedacht worden aan het aspect van drainage en de spreiding van de buizenst over de verschillende Gt's.

6.3 Resultaten

De plausibiliteit van de uitkomsten voor de gerichte opnames kan goed worden bekeken indien de berekende GHG tegen de GLG wordt uitgezet. Een aantal resultaten blijken gezien de definitie van de GxG fysiek onmogelijk. Daarnaast blijkt uit buisgegevens dat het verschil tussen de GHG en de GLG vaak minimaal 20 cm is. Grote verschillen tussen de GHG en de GLG kunnen voorkomen, maar zijn vaak te wijten aan slecht doorlatende lagen in de bodem. Door extrapolatie kan voor de GxG van de gerichte opnamepunten een irreële waarde worden voorspeld. Het gebruik van het een extrapolatiecriterium heeft echter wel tot gevolg dat de spreiding van de voorspellingen afneemt. Vooral de natte Gt's, Gt I en II, worden na gebruik van het extrapolatiecriterium weinig voorspeld. De natte Gt's zijn echter in de stambuizenst ook ondervetegenwoordigd. Selectie van de data resulteert uiteindelijk in een consistente dataset van verschillende bronnen.

Literatuur

Bierkens, M.F.P., M. Knotters en F.C. van Geer. 1999. *Tijdreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties*. Stromingen 5/2: 43-54.

Bierkens, M.F.P. and W.A. Bron, 2000. 3. *VIDENTE: a graphical user interface and decision support system for stochastic modelling of water table fluctuations at a single location; Includes documentation of the programs KALMAX, KALTFN, SSD and EMERALD and introductions to stochastic modelling*. Wageningen, ALTERRA, Green World Research. Alterra-Karakterisering XG3-versie11.doc.

Bierkens, M.F.P en H. Th. L. Massop, 2000. *Optimalisatie meetlocaties grondwaterstanden Waterschap De Aa; Representatieve locaties voor grondwaterafhankelijk peilbeheer*. Alterra-rapport 010.

Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp. 1995. *Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften Deel B: Grondwater*. Technisch document 19B, DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Finke, P.A., D.J. Brus, T. Hoogland, J. Oude Voshaar, F. de Vries en D. Walvoort, 1999a. *Actuele grondwaterinformatie schaal 1:10 000 in de Waterschappen Wold en Wieden en Meppelerdiep. Gebruik van digitale maaiveldhoogten bij de kartering van GHG, GVG en GLG*. SC-Rapport 633.

Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus en F. de Vries. 1999b. *Pilot naar grondwaterkaarten in het Weerijsg gebied*.

Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters, F. de Vries. 2002. *Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap de Aa*. Alterra-rapport 180

Gaast, J.W.J. van der en H. Th. L. Massop, 2003. *Grondwatergestuurd peilbeheer; Peilwijzer*. Alterra-rapport in prep.

Hoogland, T., P.A. Finke en F. de Vries. 2003. *Actualisatie grondwatertrappenkaart Waterschap Rijn en IJssel*. Alterra-rapport 126.

Knotters, M. en P.E.V. van Walsum. 1994. *Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop*. SC-Rapport 350.

Knotters, M. en M.F.P. en Bierkens, 1999. *Tijdreeksmodellen van de grondwaterstand. Een kijkje in de black box*. Stromingen 5, 3: 35-50.

Knotters, M. en M.F.P. Bierkens. 1999. *Hoe lang moet je de grondwaterstand meten om iets over de dynamiek te weten?* Stromingen 5(4):5-12.

Lankester, J en C. Maas, 1996. *Een onderzoek naar karakterisering van vegetatiekundige standplaatsen op basis van impulsresponsies*. Stromingen 2(3):5-17.

Montgomery, D.C. and E.A. Peck, 1992. *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley and sons inc, New York.

Oude Voshaar, J.H., 1994. *Statistiek voor onderzoekers. Met voorbeelden uit de landbouw- en natuurwetenschappen*. Wageningen pers.

Riele, W.J.M. te en D.J. Brus, 1991. *Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG*. Staring Centrum Rapport 158.

Riele, W.J.M. te en D.J. Brus. 1992. *Het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterkarakteristieken (GHG en GLG)*. SC-Rapport 209.

Wouw Mark van der, 2000. *De GHG, zo veranderlijk als het weer*. Stromingen (3):

Niet gepubliceerde bronnen

Heidema, A.H., 2001. *Kwaliteit Gt-informatie van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000*. Wageningen, Alterra Interne mededeling.

Massop H. Th.L, P.J.T van Bakel en J. Huygen, 1999. *Analyse van de verandering in de GHG over de periode 1980-1998 in het beheersgebied van het waterschap De Dommel*. Wageningen, SC-DLO Interne mededeling.

Aanhangsel 1 GxG berekend op basis van meetgegevens

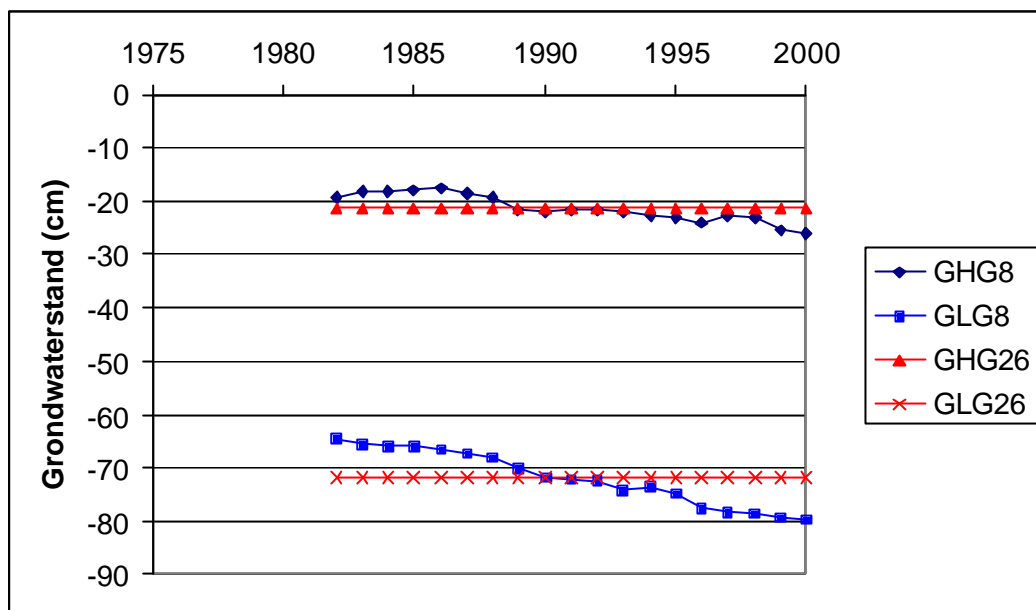


Fig 1.1 GxG berekend op basis van metingen voor meetpunt 12EL0003.

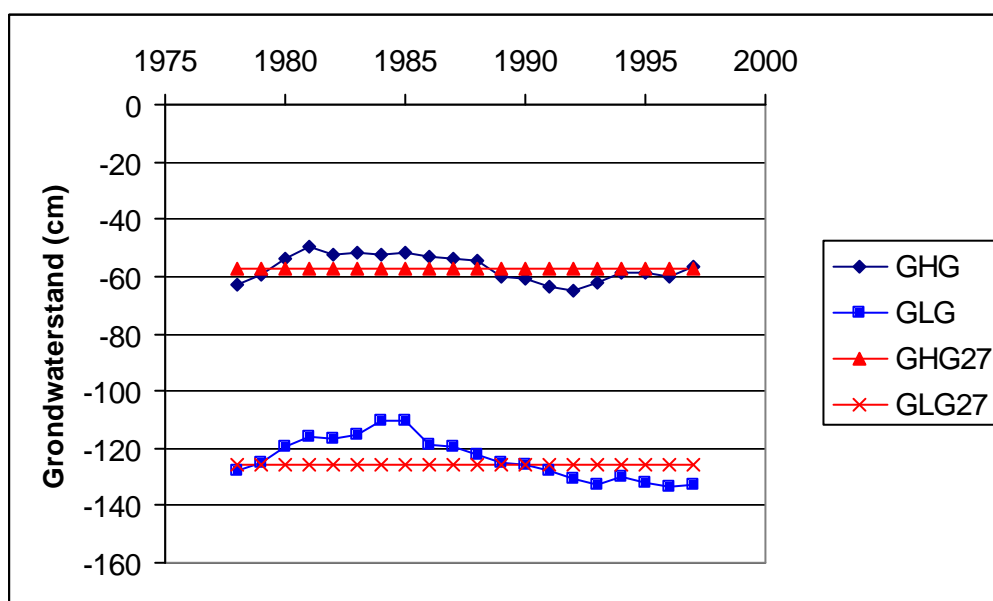


Fig 1.2. GxG berekend op basis van metingen voor meetpunt 34DP0155.

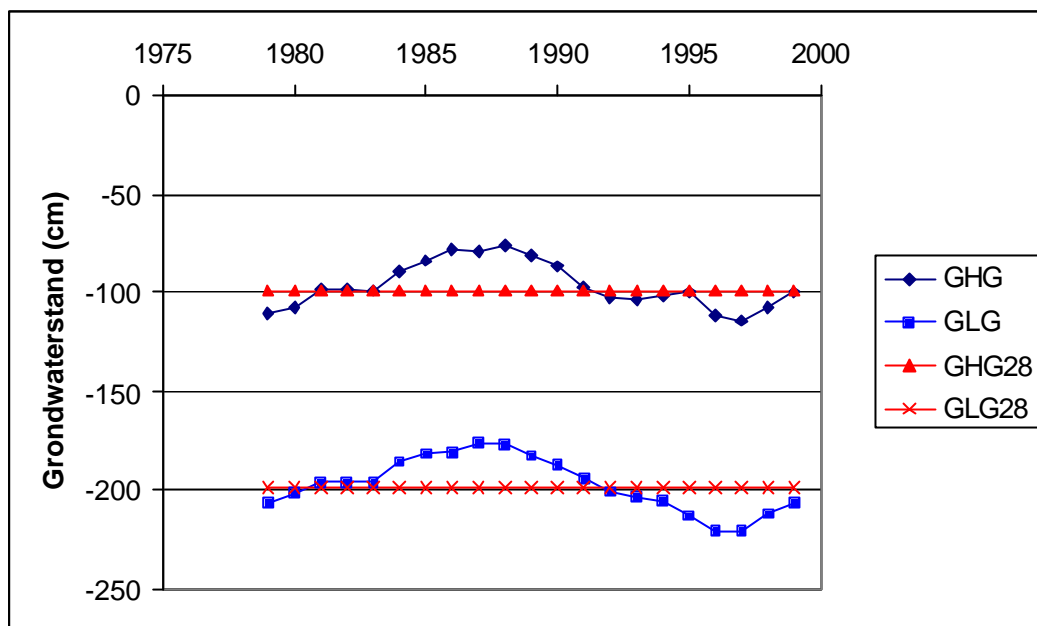


Fig 1.3 GxG berekend op basis van metingen voor meetpunt 52GL0023.

Aanhangsel 2 GxG berekend op basis van tijdreeksanalyse

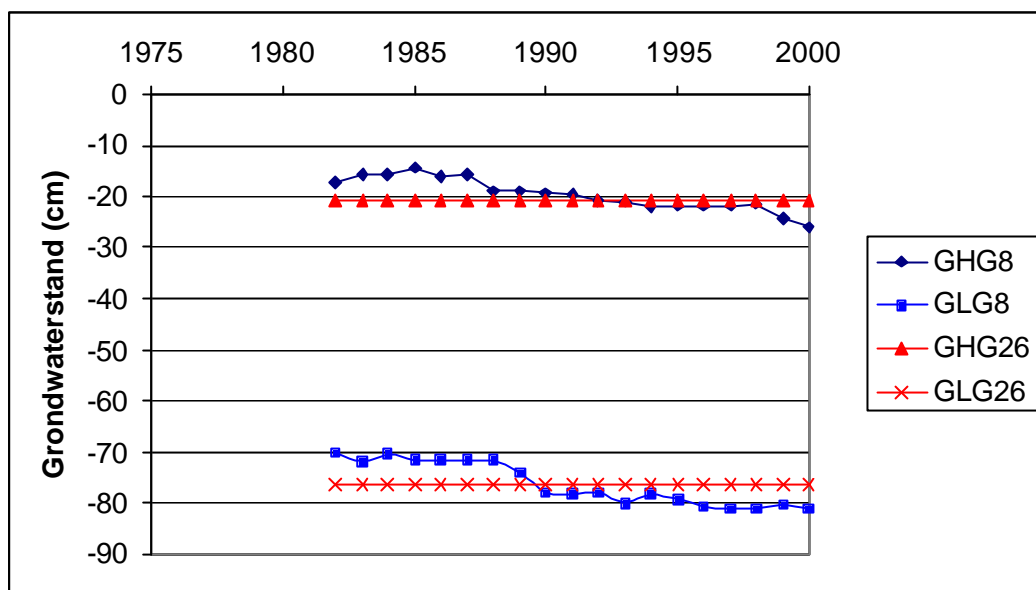


Fig 2.1 GxG berekend op basis van tijdreeksanalyse met voortschrijdende achtjarige kalibratieperiode en gelijke simulatieperiode (1971- 2000) voor meetpunt 12EL0003.

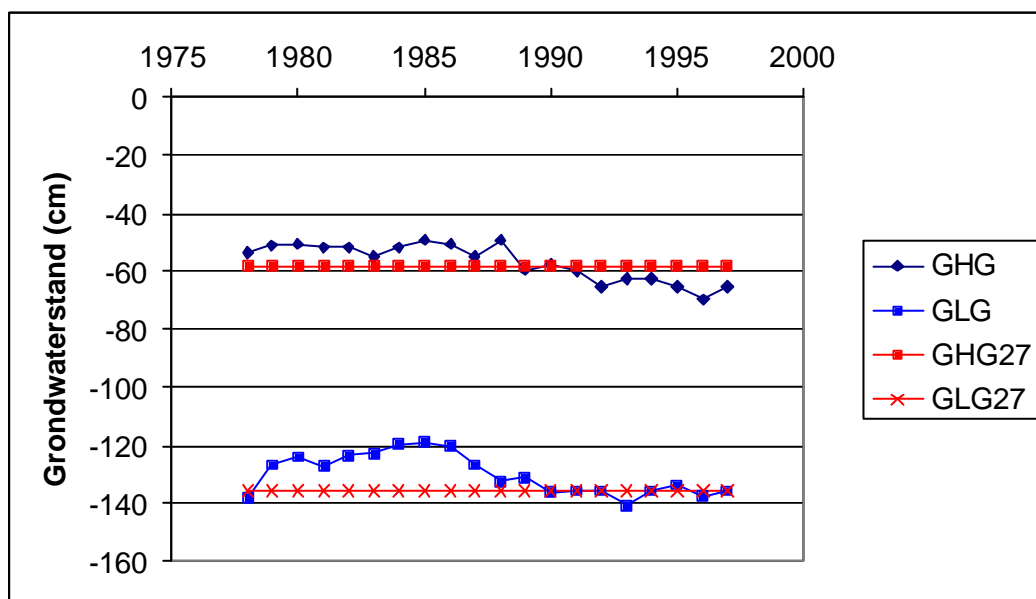


Fig 2. 2. GxG berekend op basis van tijdreeksanalyse met voortschrijdende achtjarige kalibratieperiode en gelijke simulatieperiode (1971- 2000) voor meetpunt 34DP0155.

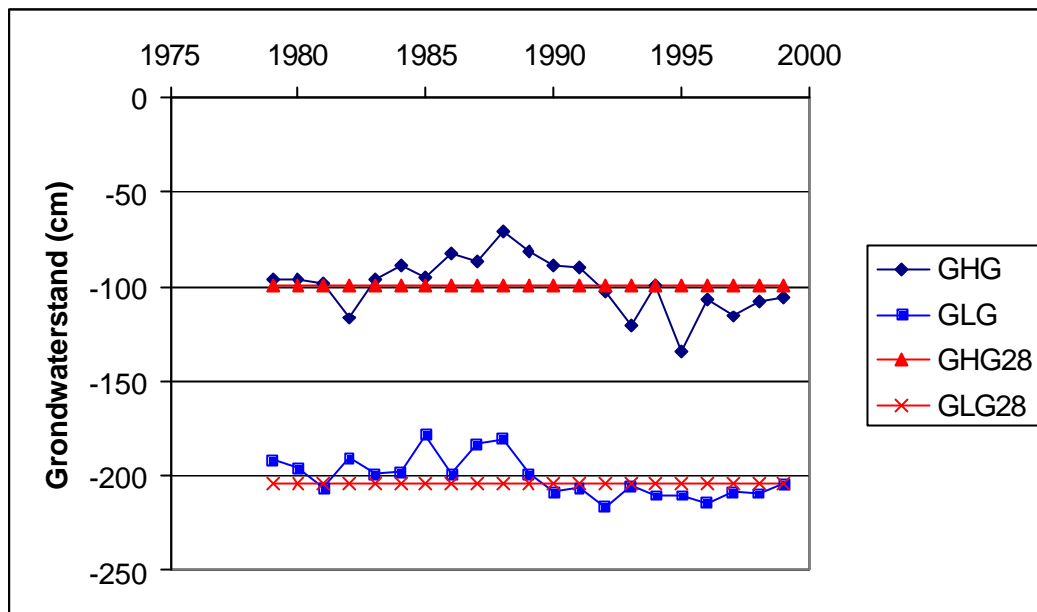
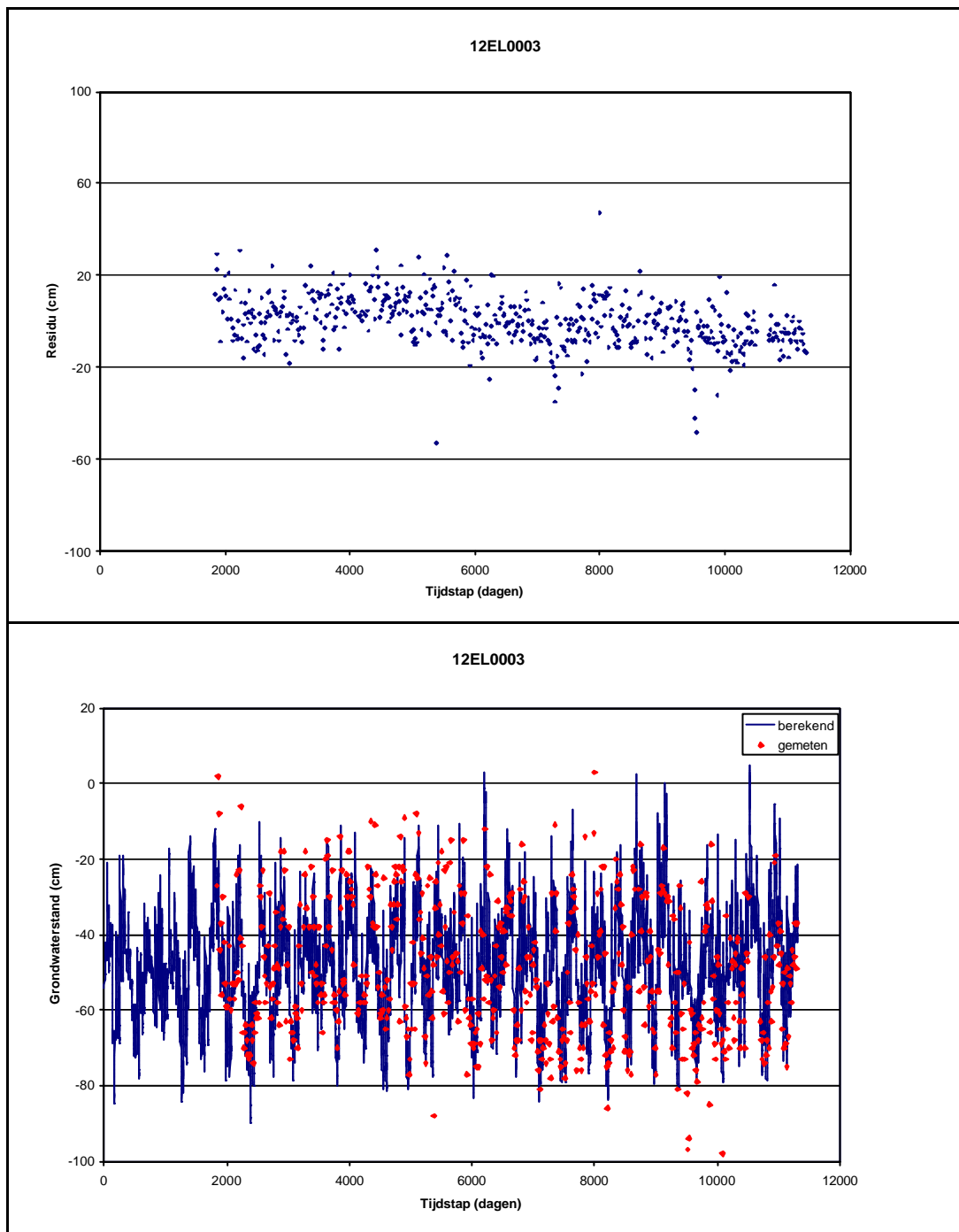
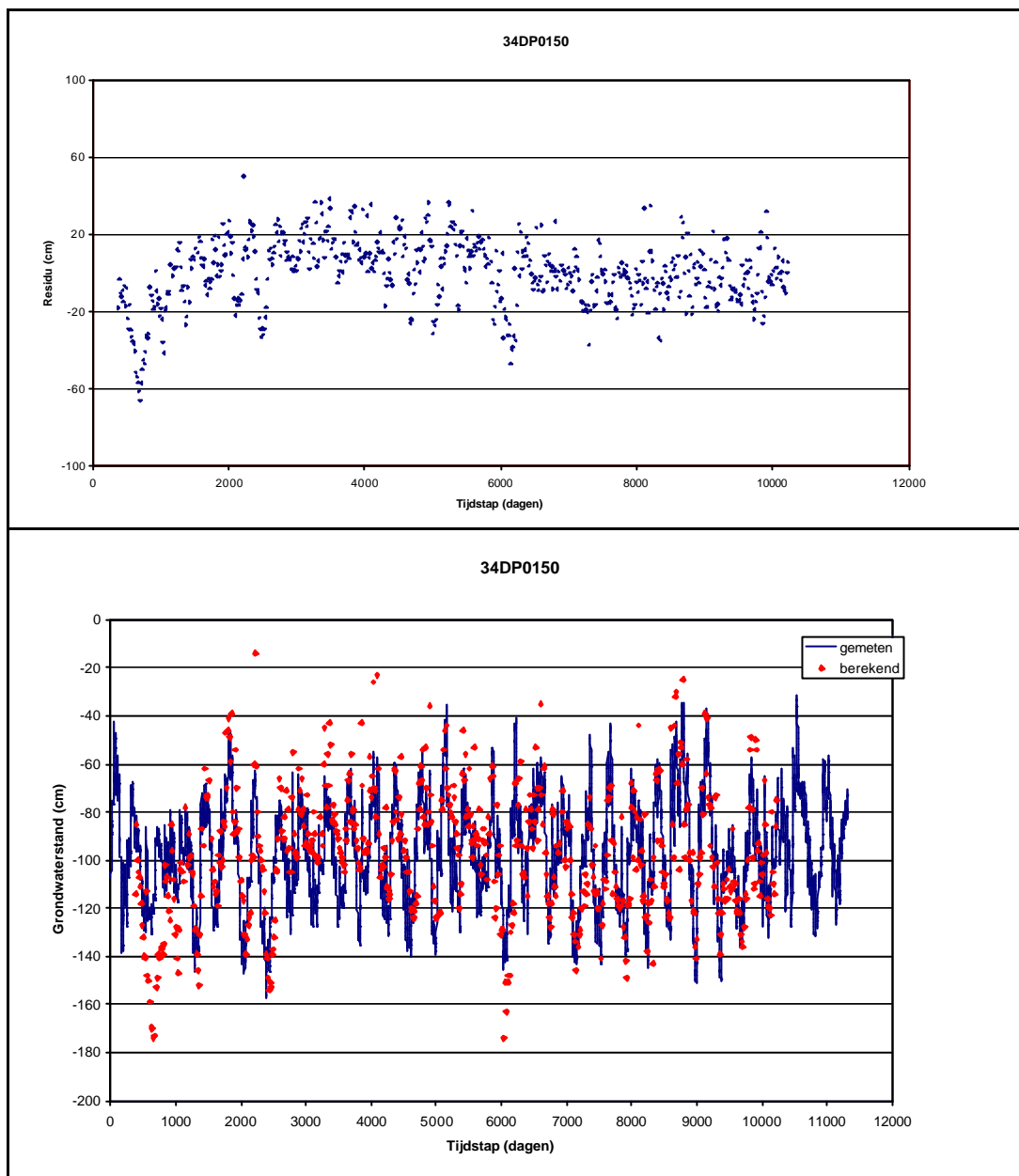
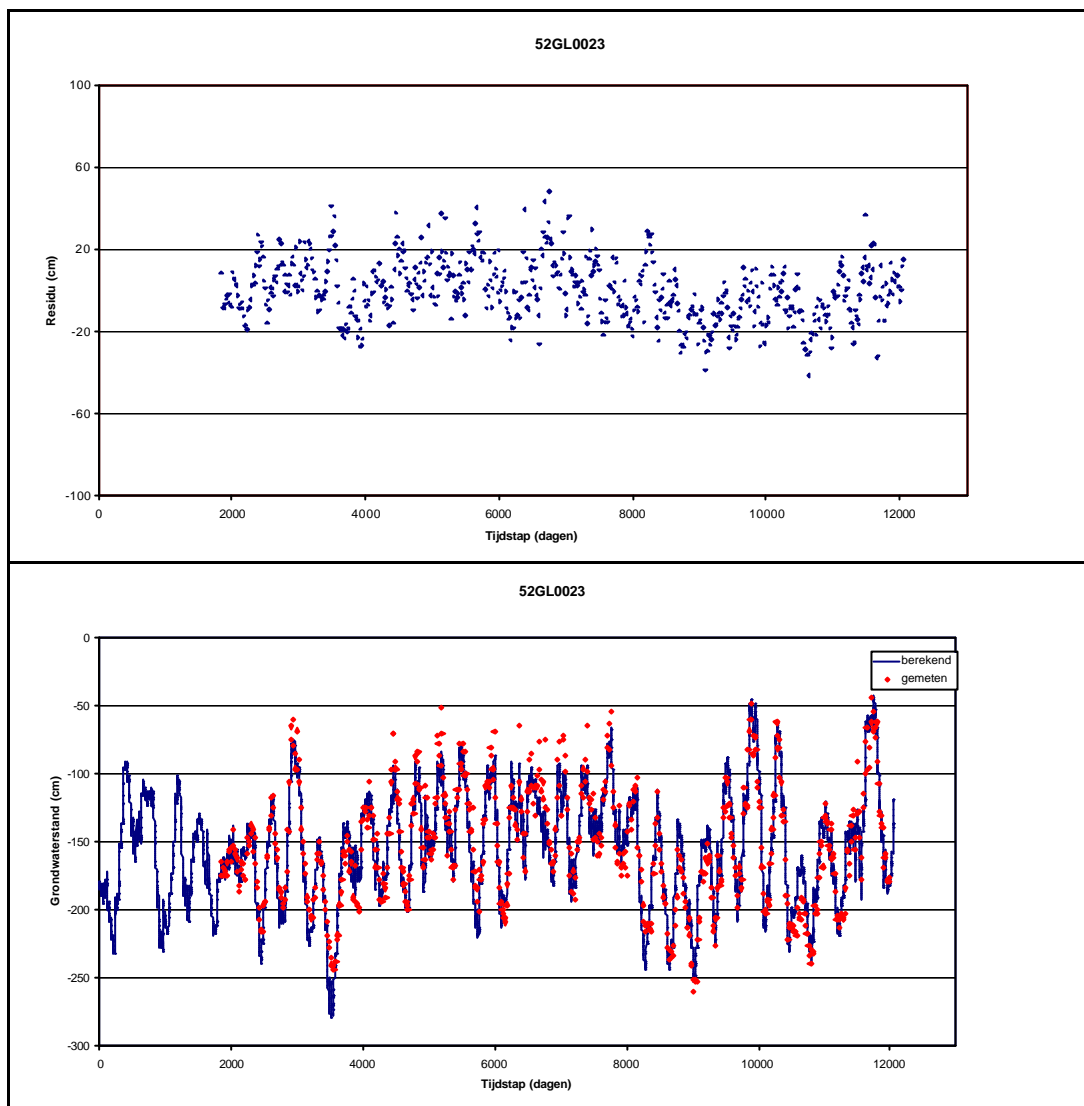


Fig 2.3. GxG berekend op basis van tijdreeksanalyse met voortschrijdende achttjarige kalibratieperiode en gelijke simulatieperiode (1970- 1999) voor meetpunt 52GL0023.

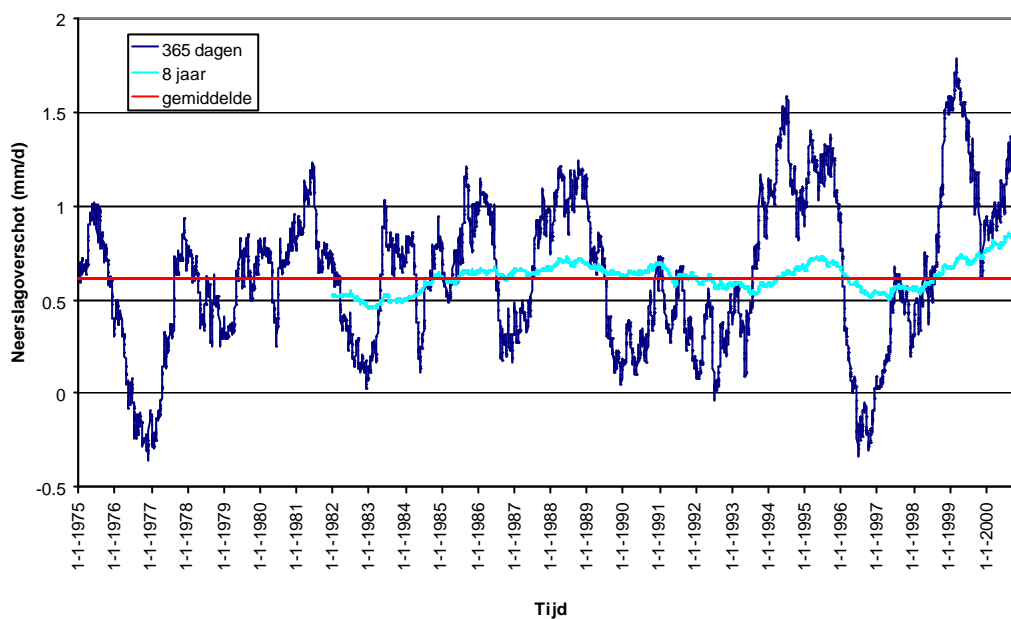
Aanhangsel 3 Tijdreeksresultaten bij kalibratie op bijna 30 jaar



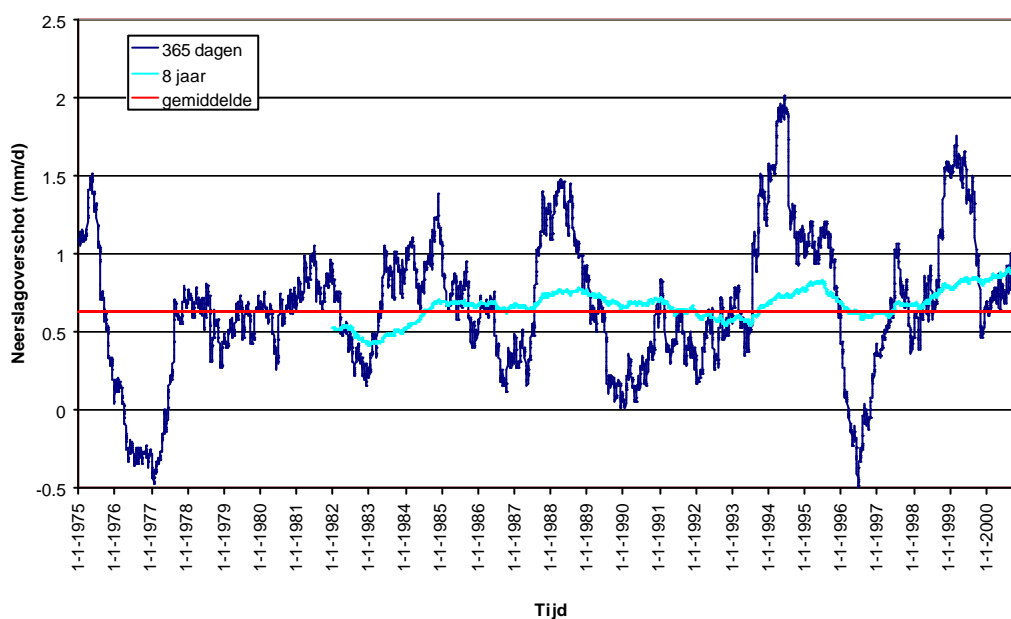




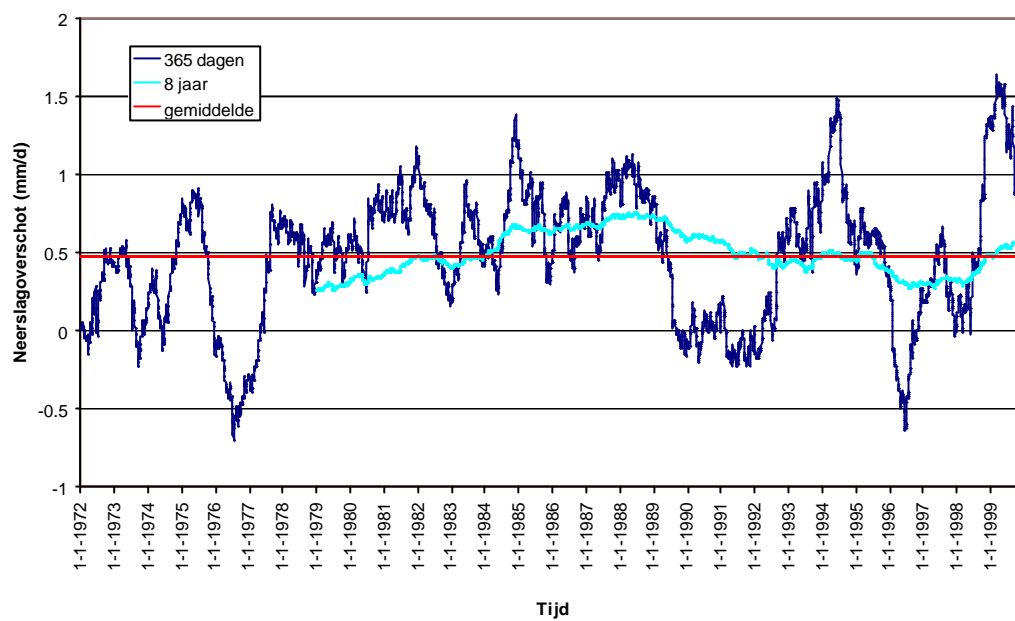
Aanhangsel 4 Voortschrijdend gemiddelde neerslagoverschot



Neerslagstation Onnen (158)



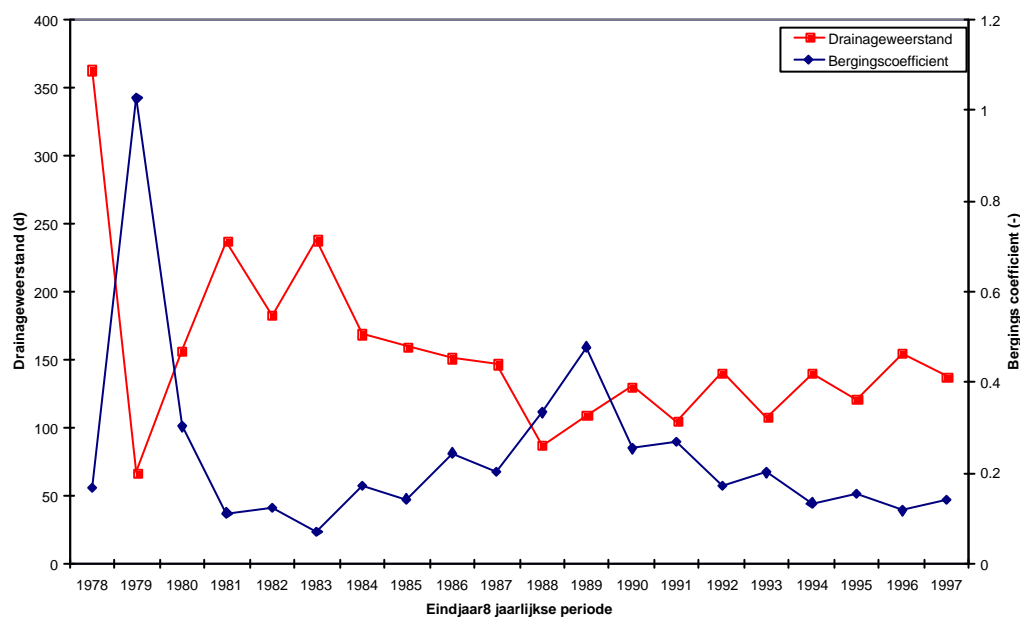
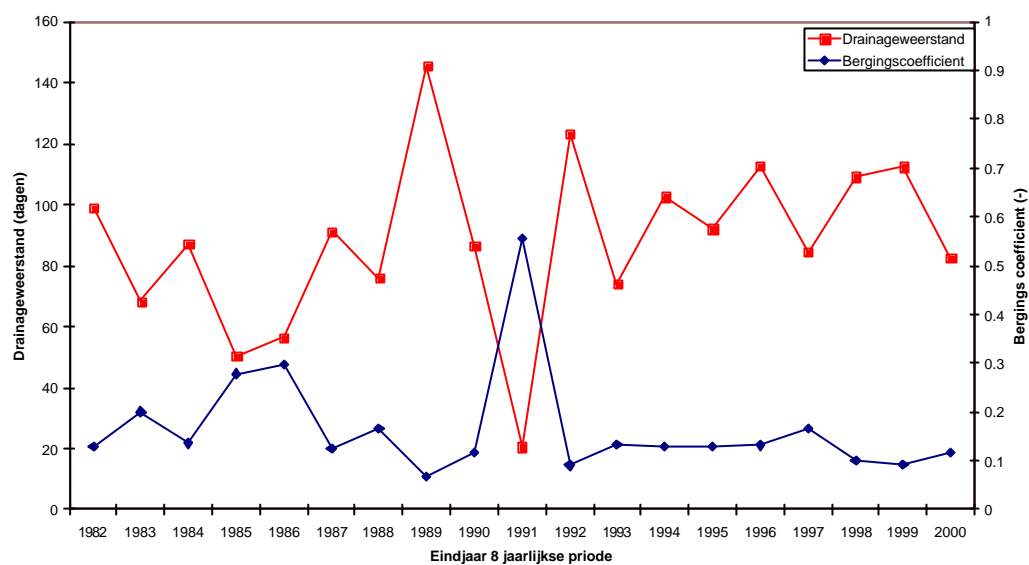
Neerslagstation Borculo (669)

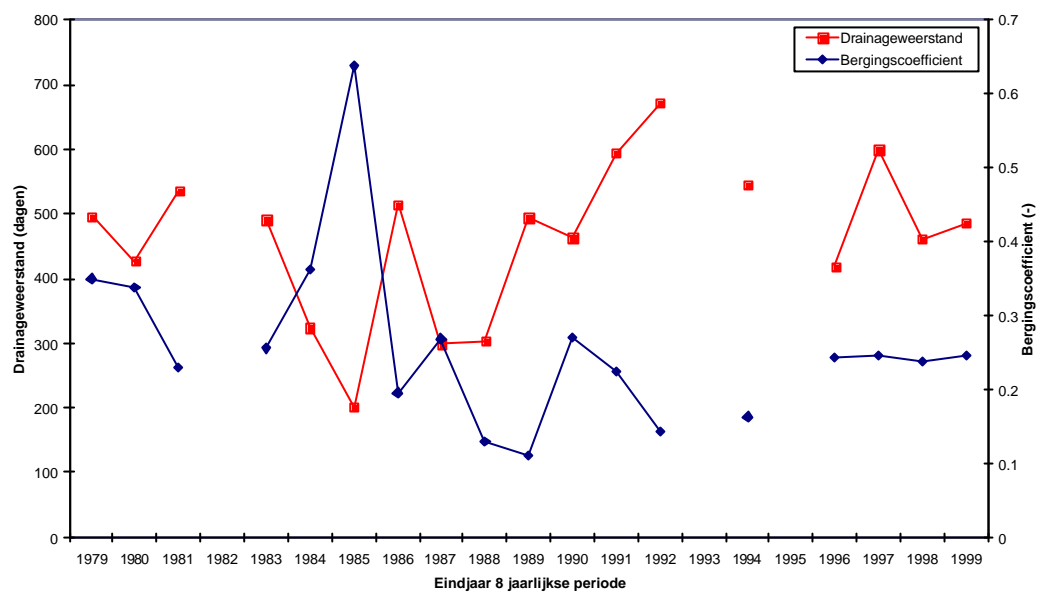


Neerslagstation Sevenum (883)

Aanhangsel 5 Fysische parameters

12EL0003





Aanhangsel 6 Relaties meetdata

In de volgende figuren zijn de relaties tussen meetdata en GHG, GLG, HG3 en LG3 weergegeven. De meetdata zijn opgezet conform de onderstaande tabel. De figuren geven de relatie weer tussen de grondwaterstand op de 14e of 28e van de maand voor het jaar 1995 en de GxG en xG3 voor 99 stambuislocaties die gelegen zijn in het centrale deel van Overijssel.

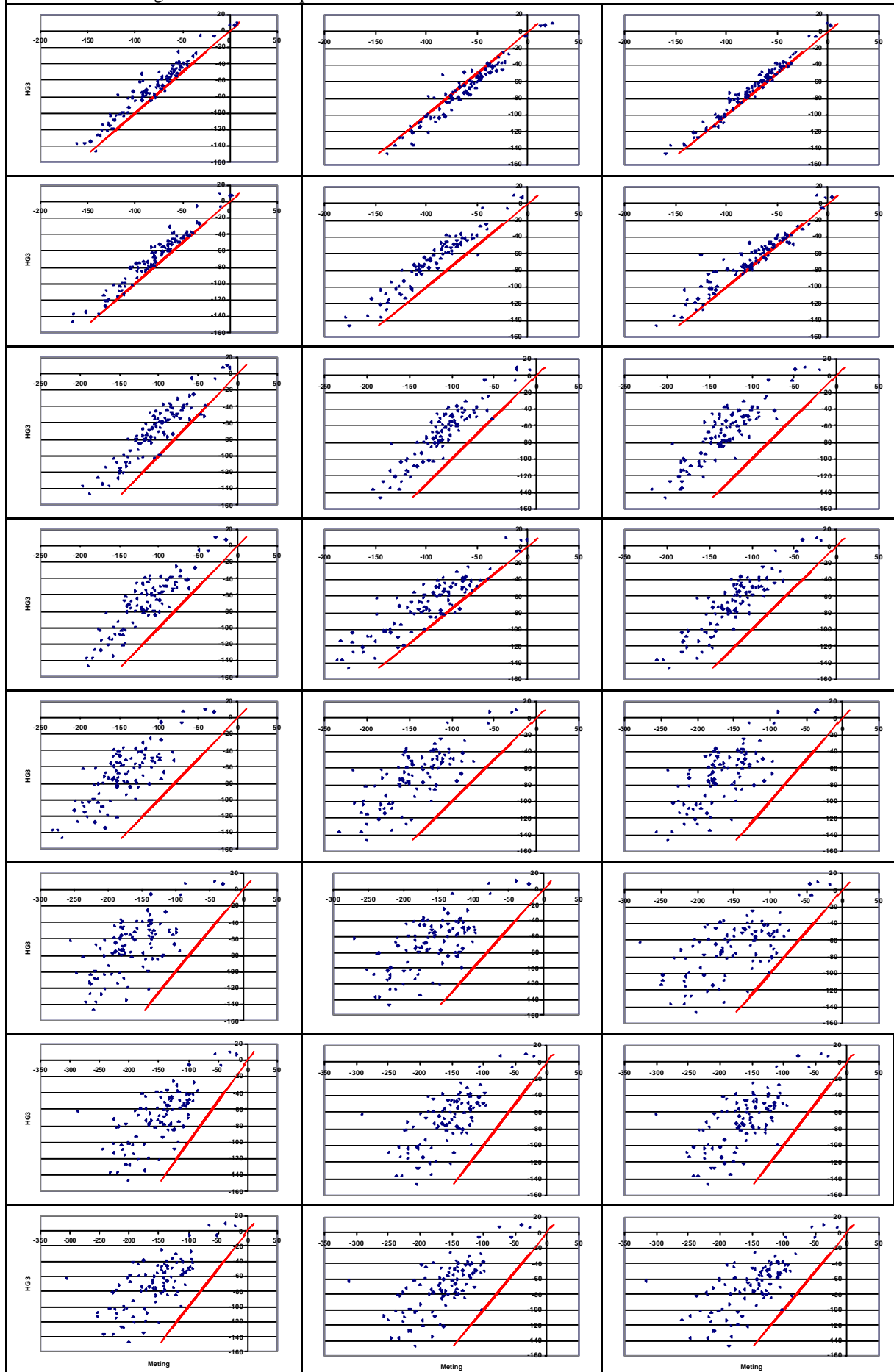
In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de data. De opzet van de tabel komt overeen met de opzet van de figuren.

14 januari 1995	28 januari 1995	14 februari 1995
28 februari 1995	14 maart 1995	28 maart 1995
14 april 1995	28 april 1995	14 mei 1995
28 mei 1995	14 juni 1995	28 juni 1995
14 juli 1995	28 juli 1995	14 augustus 1995
28 augustus 1995	14 september 1995	28 september 1995
14 oktober 1995	28 oktober 1995	14 november 1995
28 november 1995	14 december 1995	28 december 1995

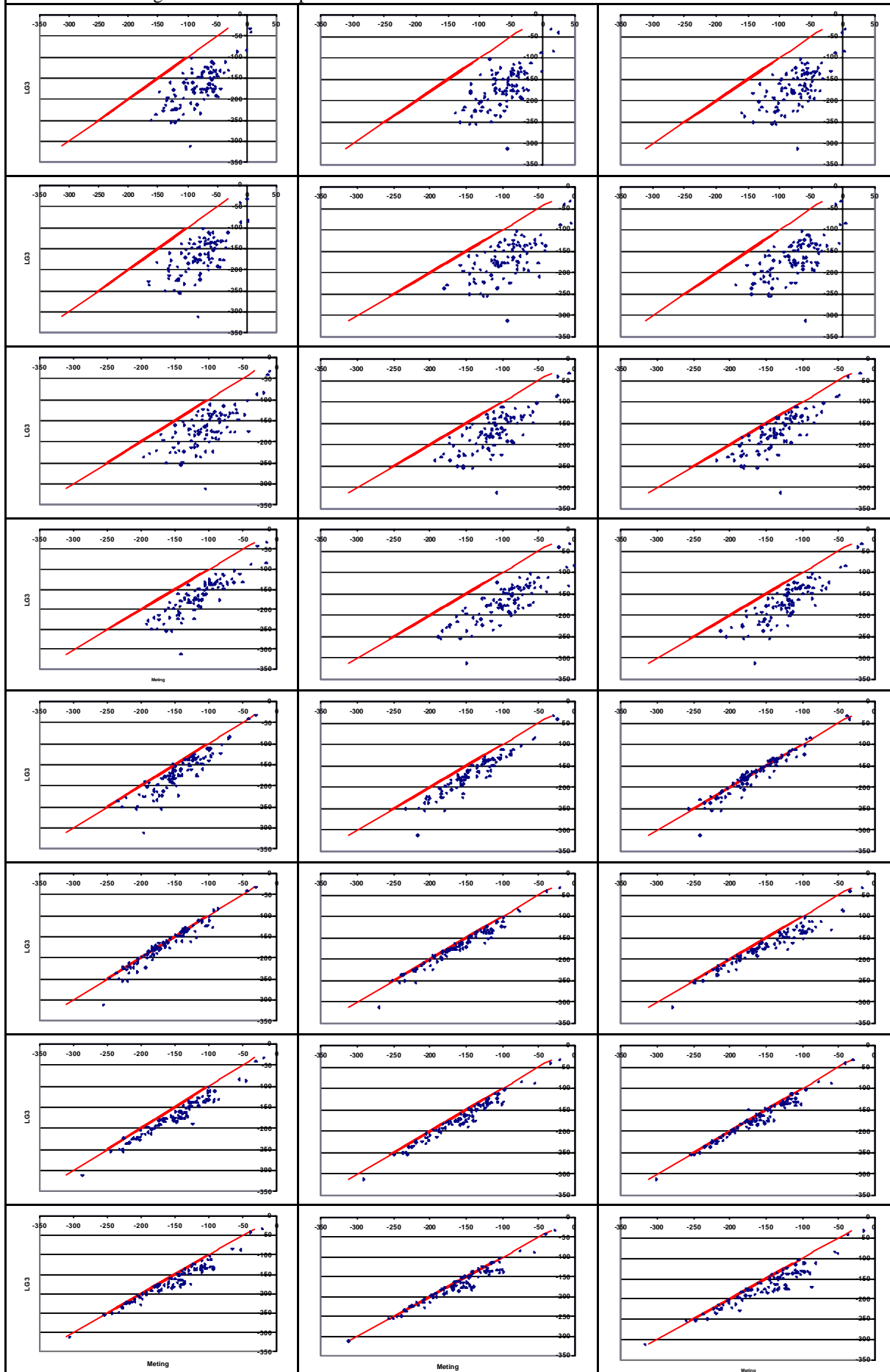
Correlatie coëfficiënt (R2) voor de stand op de 14e of 28e van de maand en de xG

HG3	LG3	GHG	GLG
0.936	0.512	0.769	0.500
0.934	0.420	0.672	0.402
0.971	0.428	0.625	0.380
0.951	0.428	0.599	0.363
0.922	0.428	0.574	0.359
0.907	0.441	0.606	0.388
0.832	0.469	0.520	0.368
0.838	0.541	0.557	0.441
0.762	0.643	0.544	0.545
0.769	0.756	0.682	0.680
0.800	0.670	0.733	0.630
0.795	0.717	0.672	0.633
0.627	0.820	0.615	0.738
0.572	0.902	0.646	0.798
0.510	0.923	0.608	0.817
0.410	0.936	0.571	0.835
0.427	0.959	0.612	0.863
0.410	0.931	0.622	0.871
0.501	0.947	0.753	0.903
0.503	0.958	0.747	0.907
0.480	0.957	0.713	0.898
0.482	0.943	0.750	0.908
0.479	0.943	0.745	0.909
0.463	0.897	0.748	0.880

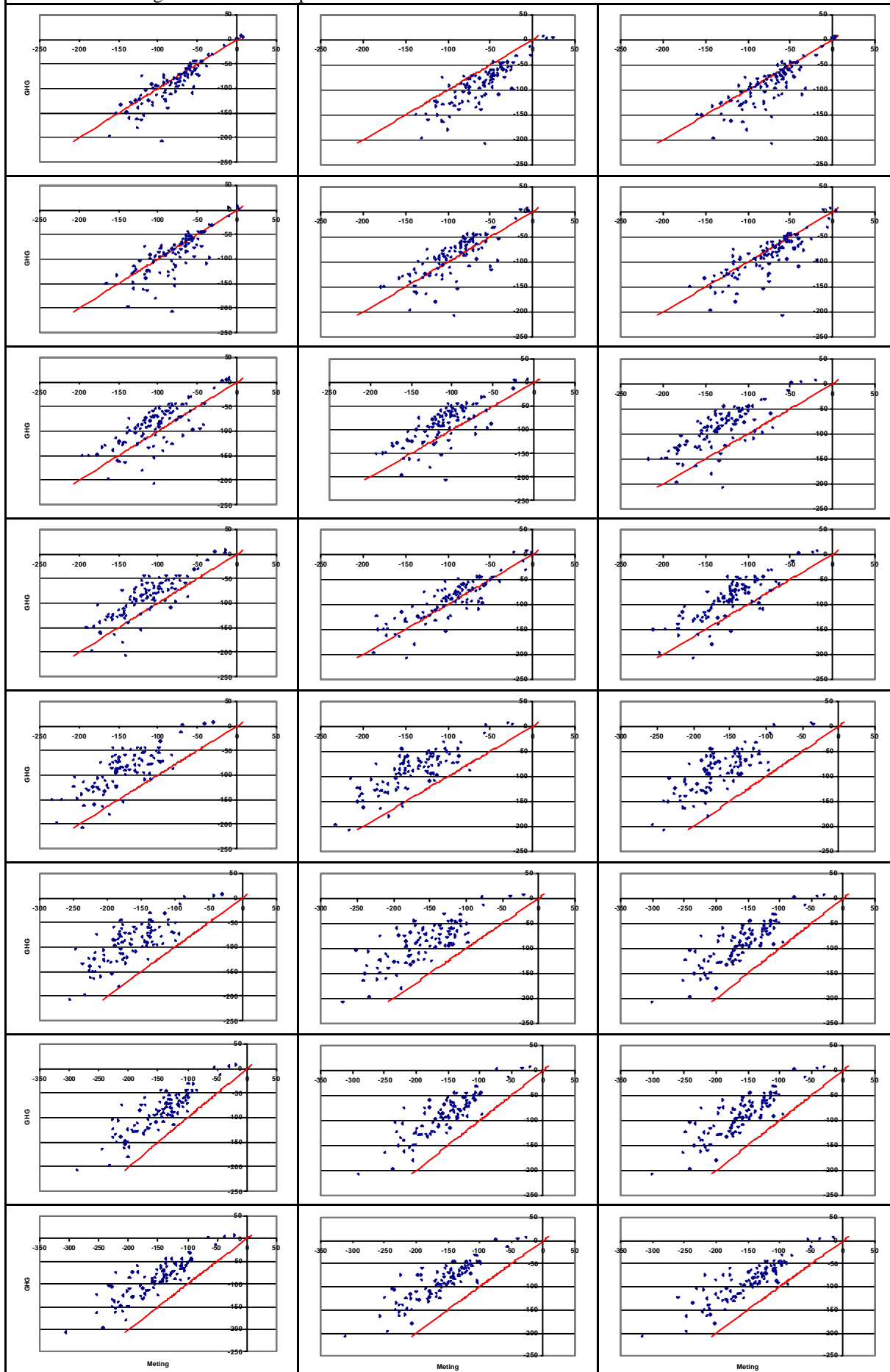
Relatie tussen de grondwaterstand op de 14^e en 28^e van de maand in 1995 en de HG3-1995



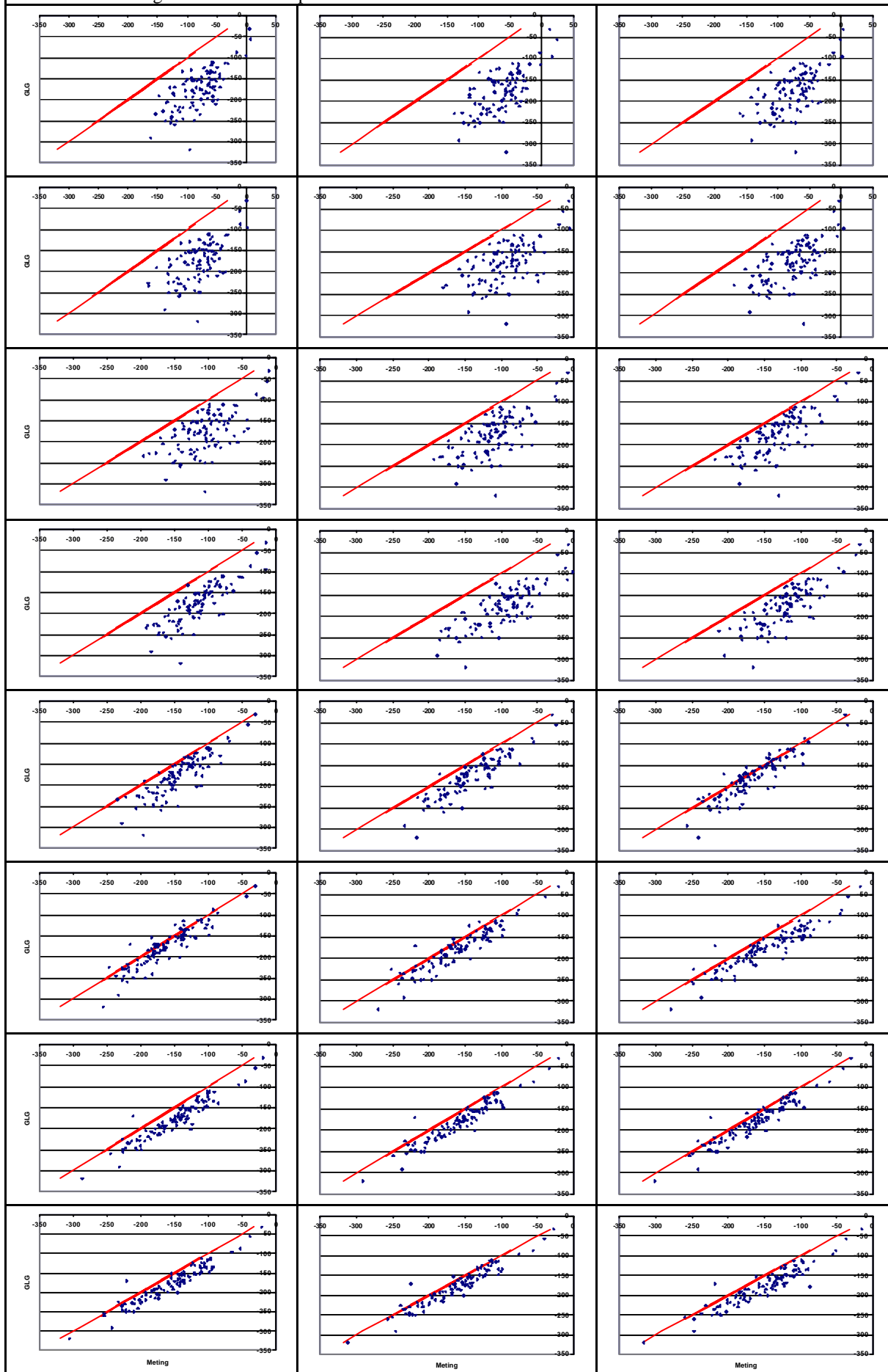
Relatie tussen de grondwaterstand op de 14^e en 28^e van de maand in 1995 en de LG3-1995



Relatie tussen de grondwaterstand op de 14^e en 28^e van de maand in 1995 en de GHG

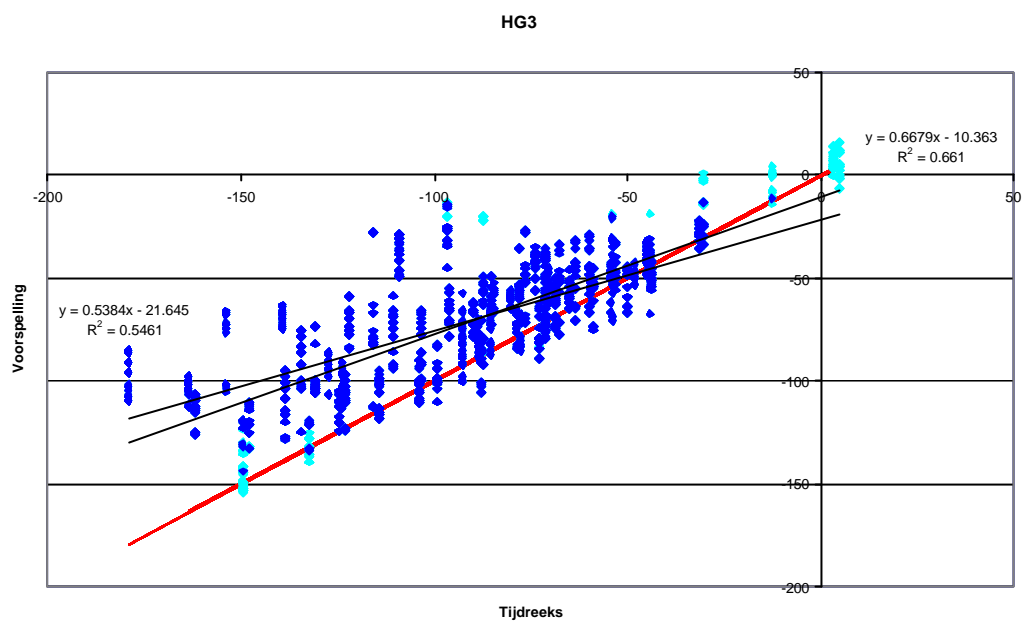


Relatie tussen de grondwaterstand op de 14^e en 28^e van de maand in 1995 en de GLG

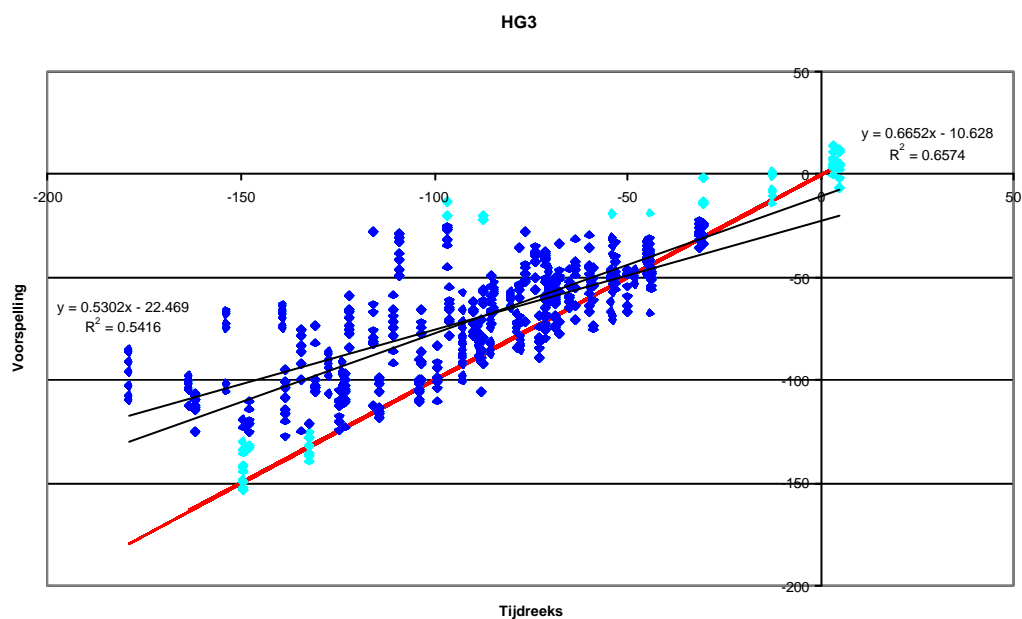


Aanhangsel 7 Stambuisregressie

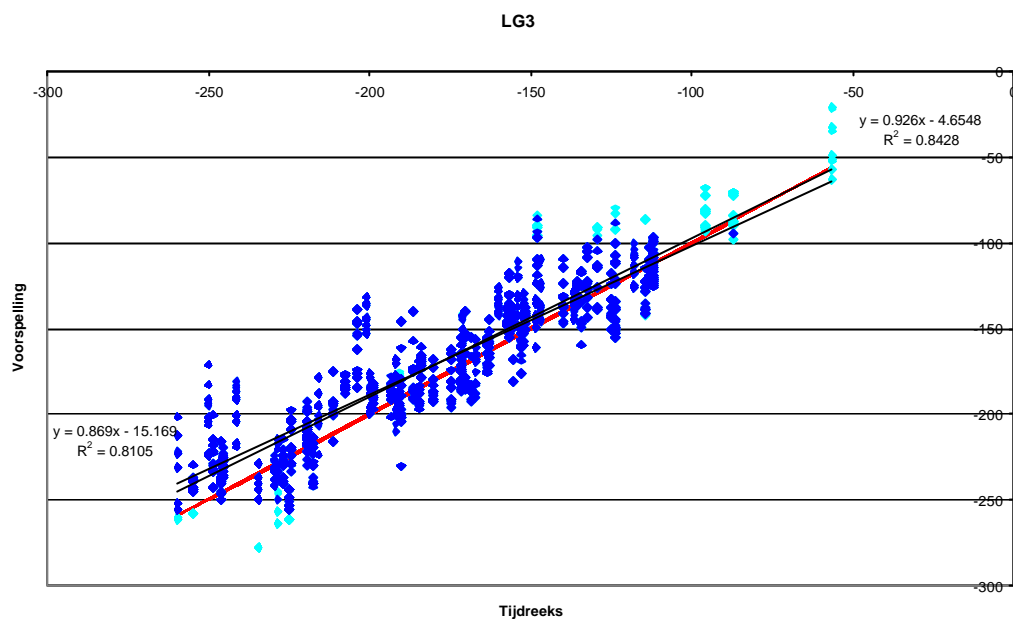
HG3 voorspelling op basis van modelselectie



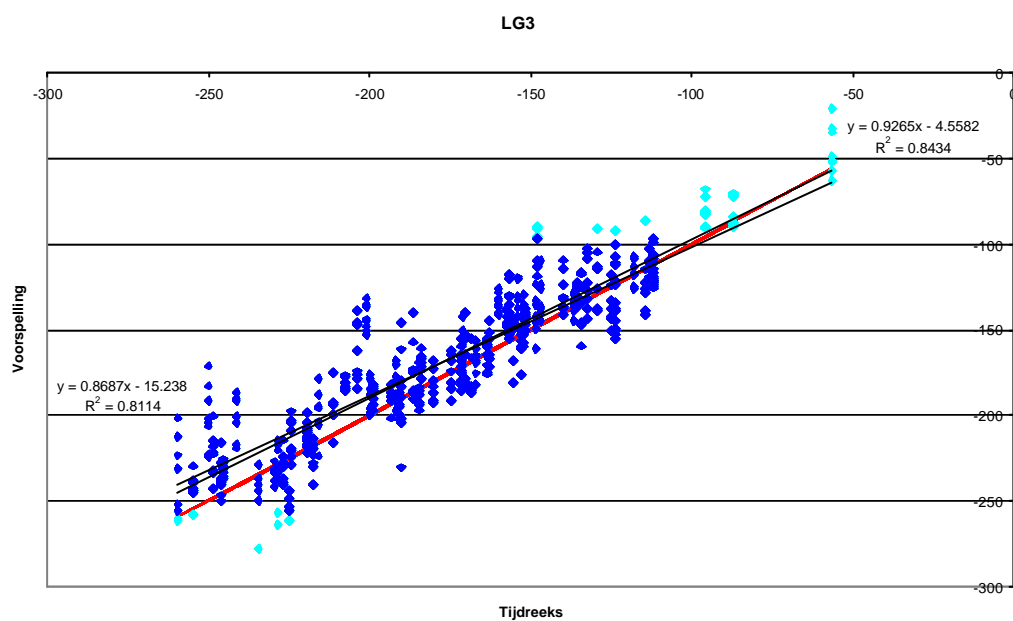
HG3 voorspelling op basis van de gemeten winterstand



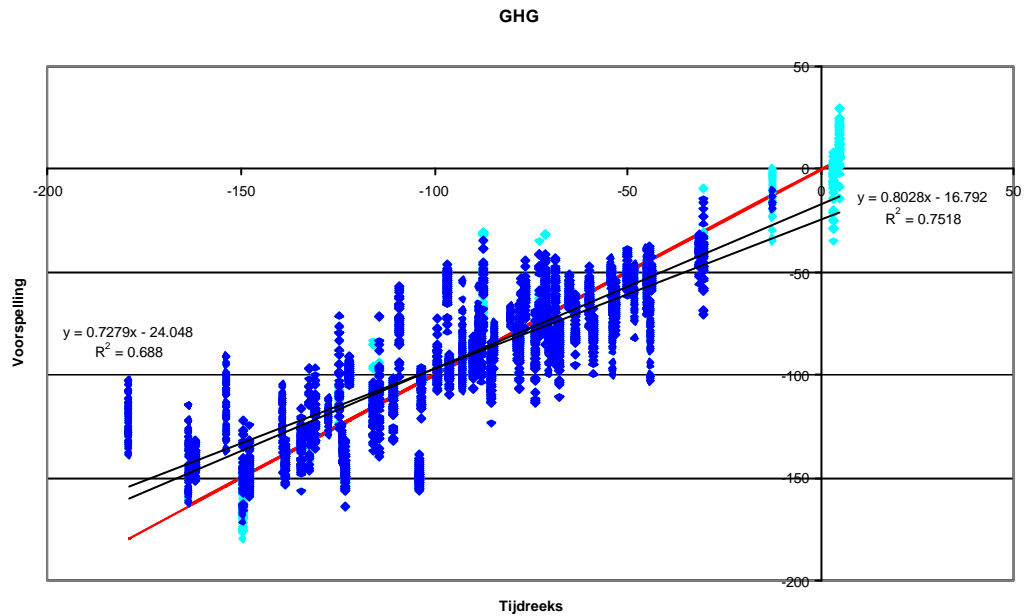
LG3 voorspelling op basis van modelselectie



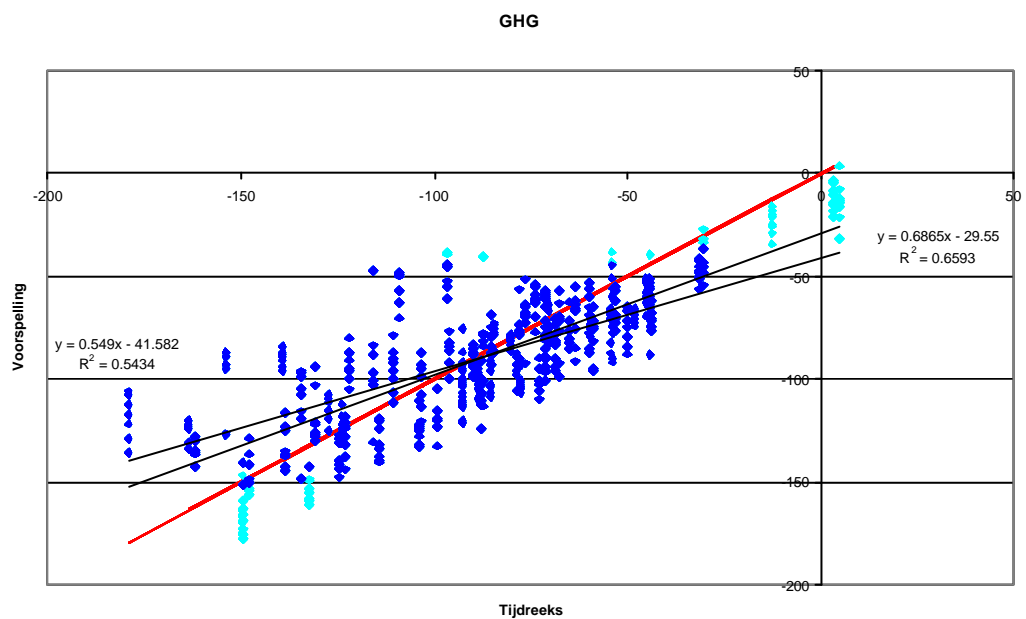
LG3 voorspelling op basis van de gemeten zomerstand



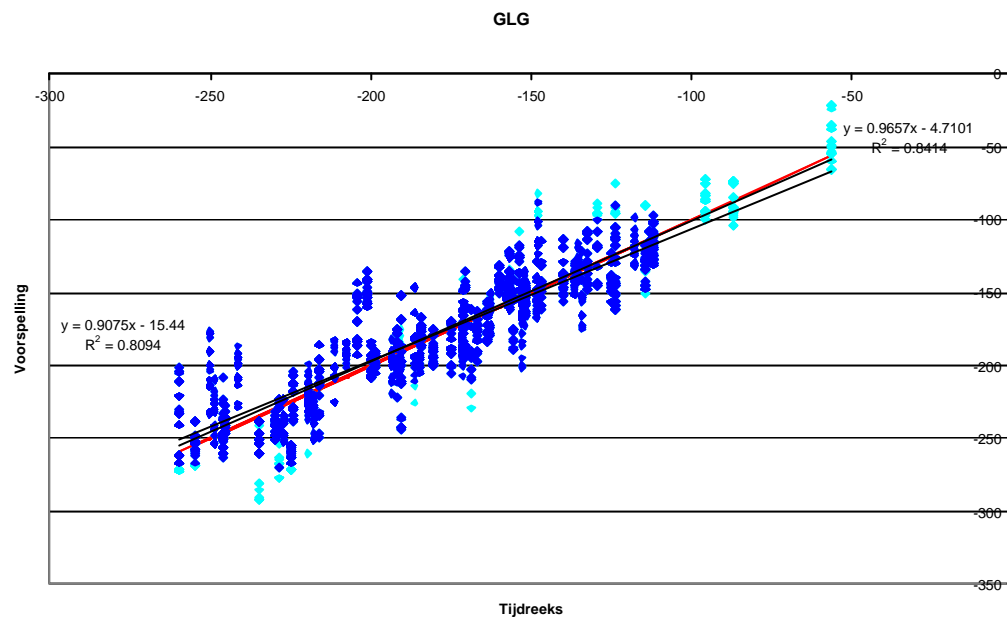
GHG voorspelling op basis van modelselectie



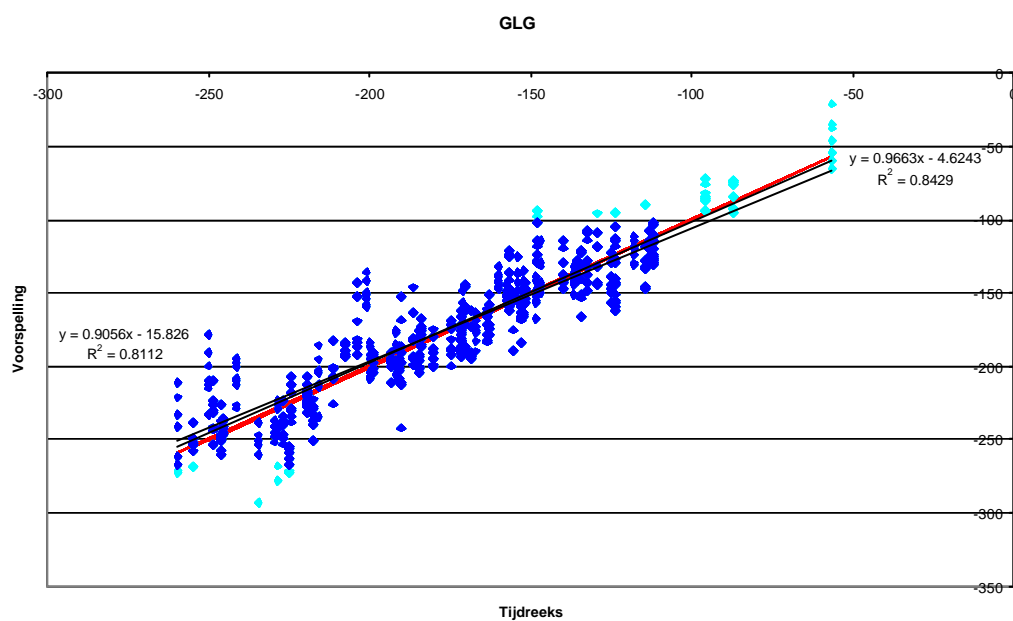
GHG voorspelling op basis van de gemeten winterstand



GLG voorspelling op basis van modelselectie



GLG voorspelling op basis van de gemeten zomerstand



Aanhangsel 8 Vertaling van de grondwatertrap naar GxG

Tabel 1. Vertaling van de grondwatertrap op de bodemkaart 1: 50 000 naar de GxG

Grondwatertrap	GHG	GLG	GVG
I	-5	38	8
II	7	66	24
II*	32	67	45
III	17	103	39
III*	32	102	51
IIIa	17	103	39
IIIb	32	102	51
IIb	32	67	45
IV	56	104	72
IVa	56	104	72
V	17	135	45
V*	32	142	59
VI	61	155	85
VII	101	190	125
VII*	185	281	212
VIII	500	700	553
Va	17	135	45
Vb	32	142	59
bVI	61	155	85
bVII	101	190	125
sV	17	135	45
sVI	61	155	85
sVII	101	190	125
sVa	17	135	45
sVb	32	142	59